

9. Коноплев М. А. Применение аппарата нечеткой логики для определения уровня опасности столкновения / М. А. Коноплев // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 2. — С. 34–39.

10. Головченко Б. С. Информационная система сбора данных о движении судов на морской акватории / Б. С. Головченко, В. М. Гриняк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2. — С. 156–162.

УДК 656.61.052

В. Е. Львов,
ассист.

КОМПЕНСАЦИЯ ВОЛНОВОГО И ВЕТРОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ СУДНА

COMPENSATION OF WAVE AND WIND EFFECTS ON THE SHIP'S COURSE MANAGEMENT SYSTEM

Рассмотрена система управления курсом в шторм, в которую введены новые элементы и установлены функциональные связи по ветру и волнению, которые позволяют повысить надежность работы системы, ее быстродействие и экономичность, особенно в штормовых условиях. Выполнено введение в контур регулирования устройств расчета угла ветрового и волнового дрейфа и введение их значений в датчик курса, что позволило повысить точность управления по заданному курсу. Рассмотрен способ повышения точности определения угла компенсации за счет учета волновой составляющей, что позволяет уменьшить нагрузку на рулевую машину и создает условия для оптимизации ее использования в шторм и автоматизации управления судном при движении по криволинейным траекториям. Приведённые результаты могут быть использованы в бортовых системах управления на судне, учебном процессе на старших курсах морских учебных заведений и на курсах повышения квалификации.

Achieved an introduction to the control circuit device for calculating the angle of wind and wave drift and the introduction of their values in the course of the dial, thus improving the accuracy of control for a given course. Look at ways to improve the accuracy of determining the angle compensation by taking into account the wave component, which reduces the load on the steering apparatus and creates conditions for the optimization of its use in a storm and automation control of the vessel when driving through curves.

These results can be used in on-board control systems on board, the educational process in the senior class of maritime education and training courses.

Ключевые слова: система управления курсом, новые функциональные связи, расчет угла ветрового и волнового дрейфа, угол компенсации, оптимизация работы рулевой машины в шторм.

Key words: control system by a course, new functional connections, calculation of corner of wind and wave drift, corner of indemnification, optimization of work of steering machine in a storming weather.

ВНЕШНИЕ возмущения на судно как объект управления движением формируются в условиях ветра, волнения, течения и воздействия мелководья. Проявление внешних возмущений связано с увеличением сопротивления движению, существенным ухудшением управляемости, падением скорости хода и изменением посадки судна. Расчетные алгоритмы по учету их влияния на процесс маневрирования в настоящее время созданы не для всех видов возмущений.

Оценка внешних сил волновой природы представляет сложный теоретико-экспериментальный процесс. Известен ряд исследований в этой области, выполненный специалистами в области гидромеханики судна. Полученные результаты могут быть использованы при создании систем автоматической стабилизации судов на курсе.

В работе [1] рассмотрены способы расчета параметров состояния судна при движении в условиях шторма и использования их для выбора режимов движения судна. Однако вопросы оценки воздействия возникающего при этом волнения на движение судна не рассмотрены. Теоретические основы формирования сигналов управления на исполнительные органы для управления курсом и процессом маневрирования судна на спокойной воде приведены в работе [2].

В работе [3] проанализированы принципы построения, теория, моделирование и синтез систем управления подвижными морскими объектами широкого класса. Для расчета влияния волнения, выполненного на основе линейной теории качки, предложено определять проекции силы от волнения на координатные оси движения судна с помощью следующей зависимости, предложенной Я.И. Войткунским:

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

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

Высота волны 3 % обеспеченности $h_{3\%}$:

$$h_{3\%} = 0,03W_n^2, \quad (2)$$

где W_n — скорость истинного ветра.

С учетом приведенной формулы (2) зависимость (1) представлена в виде

$$R_{vy} = 15 \cdot 10^{-3} \rho L \cdot K_{vy} W_n^2 = C_v W_n^2, \quad (3)$$

где C_v — коэффициент волновой 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 δ_k , устанавливая рулевой привод на этот угол. В результате интегральная оценка переходного процесса существенно уменьшается до величины, сравнимой с погрешностью расчета значения угла компенсации, за счет чего уменьшается также нагрузка на рулевое устройство в штормовых условиях, производится адаптация системы управления к внешним воздействиям и повышается ее быстродействие.

В настоящей статье обосновывается выбор оценки необходимой компенсации волнового воздействия на систему управления курсом. При расчете возмущающих сил от волнового воздействия можно использовать два способа. Первый основан на методике Я. И. Войткунского [3], в которой сила воздействия на судно от волнения, рассчитывается по формуле (3). Недостаток этого способа заключается в том, что коэффициент возмущающей силы C_v определяется по приближенным эмпирическим зависимостям, имеющим существенные ограничения. Второй способ основан на определении коэффициентов волновых сил по эмпирическим зависимостям. 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 натурных условиях и их моделей в бассейне, а также соответствующие эмпирические зависимости:

$$C_x^w = 0,062 \frac{B}{T} - 0,0085 \frac{L}{T} + 0,328\delta_v; \quad (4)$$

$$C_y^w = 0,0823 \frac{L}{B} + 2,56 \frac{T}{L} + 0,903\delta_v^2; \quad (5)$$

$$C_m^w = 0,15\delta_v + 0,197\delta_v^2 - 0,00373 \frac{L}{T}, \quad (6)$$

где B — ширина судна; T — средняя осадка; L — длина судна по КВЛ; δ_v — коэффициент общей полноты судна.

Эмпирические зависимости 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 определяются по частотному составу последовательности регулярных волн:

$$X_w = C_x^w (0,1 - \cos q_w) \cdot \rho \cdot g \cdot L \left(\frac{h_{3\%}}{2} \right)^2 \cdot e^{-A_0 \frac{\lambda}{L}} \left(1 + A_1 \frac{V_n}{V_w} \right); \quad (7)$$

$$Y_w = C_y^w \cdot \sin q_w \cdot \rho \cdot g \cdot L \left(\frac{h_{3\%}}{2} \right)^2 \cdot e^{-A_0 \frac{\lambda}{L}} \left(1 + A_1 \frac{V_n}{V_w} \right); \quad (8)$$

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

где q_w — курсовой угол бега волн; g — ускорение свободного падения; A_0 — эмпирический коэффициент, учитывающий соотношение длины волны и судна (рекомендуется принимать $A_0 = 0,33$); λ — длина регулярной волны; A_1 — эмпирический коэффициент, учитывающий степень влияния скорости движения судна на силы от волнения $A_1 \in [1,0; 8,5]$; 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]. В работах [8] – [10] приведены справочные данные для выполнения расчетов.

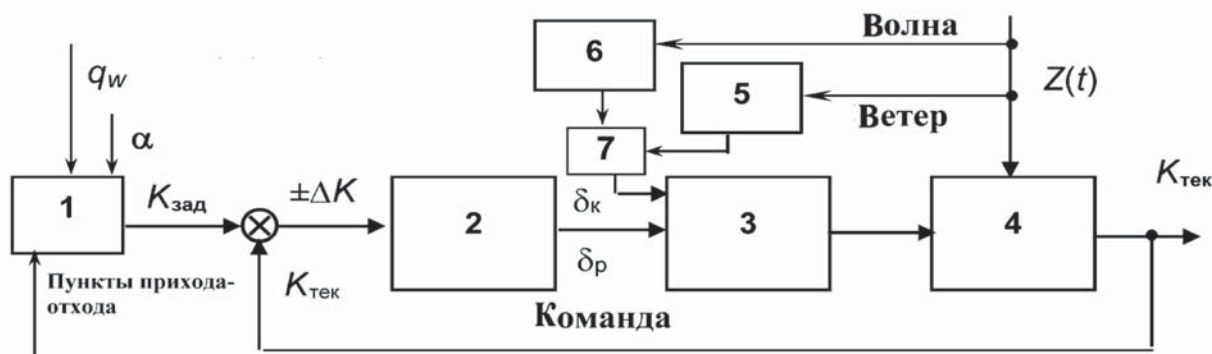
Величина плеча силы волновой природы l_w определяется путем деления формулы (9) на (8). В результате получим

$$l_w = \frac{C_x^w}{C_y^w} \cdot \frac{\sin(2q_w)}{2 - q_w / \pi} \cdot \frac{\sin q_w}{\sin q_w} \cdot L. \quad (10)$$

Приведенные 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. Структурная схема системы управления курсом судна приведена на рисунке.

Система управления функционирует следующим образом. По координатам пунктов прихода и отхода в блоке 1 определяется значение $K_{зад}$, которое поступает на устройство сравнения. По каналам обратной связи сюда же поступает текущее значение курса $K_{тек}$, и при несовпадении заданного и фактического состояния $\pm \Delta K$ информационное управляющее устройство вырабатывает команду средствам 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 определения угла компенсации с учетом ветра и волнения. В блок 7 от блоков 5 и 6 поступают значения угла ветрового и волнового дрейфа, которые вводят поправку δ_p .



Структурная схема системы управления курсом судна:

q_w — курсовой угол бега волн; α — угол ветрового дрейфа;

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 δ_k для устройства управления;

δ_r — угол перекадки руля; $Z(t)$ — внешние возмущения

Для уменьшения угла и числа перекадок руля был введен корректирующий элемент, который производит вычисление значения угла компенсации δ_k по формуле [6]:

$$\delta_k = \frac{1 + (2 / \lambda_p)}{S_p \cdot \rho} \cdot \left[\left(0,25 + \frac{l_{цп}}{L} - \frac{q_w}{360} \right) \cdot 0,37 \sin(q_w) \cdot \rho_b \cdot S_n \frac{W^2}{V_n^2} + \right. \\ \left. + \left(0,5 + \frac{l_{цбс}}{L} - \frac{\alpha}{180} \right) \cdot \frac{0,23 \sin \alpha + 1,09 \sin^2 \alpha}{(2,1 \delta_{оп} - 7T / L)^2} \cdot \rho \cdot S_n \right], \quad (11)$$

где λ_p — относительное удлинение руля; S_p — площадь пера руля; $l_{цп}$ — отстоящие центра парусности от мидель-шпангоута; L — длина судна между перпендикулярами; q_w — курсовой угол кажущегося ветра; ρ_b — массовая плотность ветра; S_n — площадь проекции надводной части корпуса судна на диаметральную плоскость; W — скорость кажущегося ветра; V_n индекс «л» — скорость судна по лагу; $l_{цбс}$ — отстояние центра бокового сопротивления от мидель-шпангоута, его можно приближенно оценить по формуле [6]:

$$l_{цбс} = \frac{1 + 2T_n / T_k}{3(1 + T_n / T_k)} - 0,5, \quad (12)$$

где α — угол ветрового дрейфа; $\delta_{оп}$ — коэффициент общей полноты; T — средняя осадка; T_n и T_k — осадка носом и кормой соответственно; S_n — площадь проекции подводной части корпуса судна на диаметральную плоскость.

Для уточнения расчета угла компенсации δ_k введен момент от волновой составляющей (9). Тогда формула для расчета совместного угла компенсации от ветра и волнения примет вид

$$\delta_k = \frac{1 + (2 / \lambda_p)}{S_p \cdot \rho} \cdot \left\{ \left[\left(0,25 + \frac{l_{цп}}{L} - \frac{q_w}{360} \right) \cdot 0,37 \sin q_w \cdot \rho_b \cdot S_n + \right. \right. \\ \left. + \left(0,5 + \frac{l_{цбс}}{L} - \frac{\alpha}{180} \right) \cdot \frac{0,23 \sin \alpha + 1,09 \sin^2 \alpha}{(2,1 \delta_{оп} - 7 \cdot T / L)^2} \cdot \rho \cdot S_n \right] + \\ \left. + \left[C_m^w \cdot \frac{\sin(2q_w)}{1 + \frac{\pi - |q_w|}{\pi}} \cdot \rho \cdot g \cdot L^2 \cdot \left(\frac{h_{3\%}}{2} \right)^3 \cdot e^{-A_0 \frac{\lambda}{L}} \cdot \left(1 + A_1 \frac{V_n}{V_w} \right) \right] \right\}. \quad (13)$$

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

Для компенсации постоянных воздействий ветроволновых внешних факторов на судно руль перекадывается на постоянный угол δ_k , и для удержания судна на курсе в условиях шторма происходит манипулирование рулем на угол δ_v около δ_k . Потеря управляемости наступает тогда, когда $\delta_k + \delta_v > \delta_{\max} = 35^\circ$. Введение в состав системы управления рулем новых элементов и установление функциональных связей по ветру и волнению позволяют 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.

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. Полученные результаты необходимы для выполнения научных исследований по разработке устройств для настройки авторулевого в шторм и создания самонастраивающихся систем управления.

Список 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.* Двигательно-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 // Мат. науч.-техн. конф. «Стан та проблеми судноводіння» / ОНМА. — Одесса, 2005. — С. 119 — 126.
5. *Пипченко А. Д.* Создание упрощенной математической модели судна, управляемого рулем и винтом / А. Д. Пипченко // Судовождение / ОНМА. — 2005. — Вып. 9. — С. 75–81.
6. *Львов В. Е.* Метод улучшения компенсационных свойств системы управления курсом судна / В. Е. Львов, А. С. Мальцев // Судовождение: сб. науч. тр. / ОНМА. — Одесса: ИздатИнформ. — 2008. — Вып. 15 — С. 99 — 103.
7. *Юрканский А. В.* Исследование управляемости судов в условиях ветра и волнения: дис. ... канд. техн. наук: 05.08.01 / А. В. Юрканский. — СПб., 2005. — 118 с.
8. *Сизов В. Г.* Теория корабля / В. Г. Сизов. — Одесса: Феникс, 2003. — 284 с.
9. *Соболев Г. В.* Управляемость корабля и автоматизация судовождения / Г. В. Соболев. — Л.: Судостроение, 1976. — 478 с.
10. *Войткунский Я. И.* Справочник по теории корабля / под ред. Я. И. Войткунского. — Т. 3. Управляемость водоизмещающих судов. — Л.: Судостроение, 1985. — 544 с.