

Интеллектуальные системы управления

УДК 629.5.062.13

Е. А. Овчинникова

Научно-технический центр интегрированных комплексов связи надводных кораблей
ЗАО «Проектно-конструкторское бюро «РИО»»

Д. А. Скороходов, д-р техн. наук

Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко

ОСОБЕННОСТИ МАНЕВРИРОВАНИЯ СУДНА В ШТОРМОВЫХ УСЛОВИЯХ

В статье показаны особенности поворота корабля в штормовых условиях и влияние параметров волнения на маневрирование корабля. В качестве примера рассмотрена линейная математическая модель движения надводного корабля. Определены частотные характеристики корабля по крену и дифференту. Представлены амплитуды возмущающего момента для бортовой и килевой качек, а также амплитуды инерционной составляющей дифракционной части возмущающего момента для бортовой качки. Приведены зависимости составляющих приведенного возмущающего момента от угла встречи с волной и выводы о резонансах бортовой и килевой качек. Для проведения запланированного маневра необходимо определить, будет или нет устойчив корабль при новых параметрах движения и не будет ли выходить крен за максимально допустимый уровень при новом курсе. Для решения первой задачи сначала необходимо определить область устойчивости, а затем, зная ее, оценить принадлежность вектора переменных состояния этой области. Если он принадлежит этой области и при этом максимальный угол крена не выходит за допустимые пределы, то данный маневр возможен, иначе – опасен.

амплитуда; возмущающий момент; волнение; движение; дифферент; инерционная составляющая; крен; корабль; маневрирование; математическая модель; море; параметры; поворот; частотные характеристики; штормовые условия; угол встречи с волной

Введение

Поворот корабля целесообразен, а иногда и совершенно необходим при изменении условий штормовой обстановки, возникновении опасности по курсу или в силу других причин навигационного или эксплуатационного характера. Уточним понятие «поворот». Для современных кораблей их положение по отношению к волне в большинстве случаев является более характерным

фактором, чем положение по отношению к ветру. Поэтому, рассматривая маневрирование корабля при шторме, под поворотом будем понимать изменение курса с переменной галса по отношению к волне. Поворотом против волны будем называть такое изменение галса, когда корабль встречает волну носом, и поворотом по волне – когда кормой.

Поворот против волны зачастую осложняется тем, что на очень крутых курсах корабль теряет скорость и вследствие этого нос его с трудом перекачивается через линию бега волн. Носовая часть палубы при этом нередко зарывается в волну.

При выполнении поворота следует выбирать такую скорость, чтобы на очень крутых курсах корабль не попал в резонансную зону килевой качки. Это уменьшит потерю скорости, облегчит управление кораблем, а также поможет избежать зарывания носовой оконечности во встречную волну.

Если при установленных значениях длины волны и периода собственных продольных колебаний корабля резонансная зона захватывает весь возможный при ходе против волны диапазон скоростей, то поворот против волны оказывается весьма затруднительным. В таком положении следует по возможности поворачивать по волне или, во всяком случае, выбрать такую скорость, чтобы уйти как можно дальше от резонансного режима килевой качки к краям резонансной зоны.

1. Особенности поворота корабля

Было замечено: если длина волны не превосходит шестикратной осадки корабля, то при повороте против волны в момент перемены галса можно иметь любую скорость; при $6T < \lambda \leq 10T$ желательно, чтобы к этому моменту скорость была возможно большей, а при $\lambda > 20T$ – возможно меньшей (λ – длина волны, T – осадка судна) [1].

При повороте по волне во избежание оголения и повреждения винта и руля, а также сильных ударов волн в кормовой подзор следует избегать попадания в резонансную зону килевой качки на очень полных курсах [2]. Для этого при коротких волнах ($\lambda < 6T$) к моменту перемены галса надо иметь либо самые малые скорости, необходимые для обеспечения поворотливости, либо скорости, превышающие 8–9 узлов; при очень длинных волнах ($\lambda > 20T$) скорости могут быть любыми [1].

Если на очень полных курсах скорость корабля превышает 8–9 узлов, то поворот по волне не является опасным при любой длине волны.

При повороте или изменении курса без смены галса судно зачастую вынуждено находиться некоторое время в условиях, близких к резонансу бортовой качки, а также проходить положение лагом к волне. Эти элементы маневрирования могут вызвать опрокидывание корабля.

Корабль может совершенно безопасно проходить положение лагом к волне в условиях, удаленных от резонансного режима бортовой качки. Поскольку при повороте корабль находится в положении лагом к волне непродолжительное время, можно несколько расширить диапазон длин волн, при которых указанный маневр допустим. В случае крайней необходимости этот маневр может быть произведен, когда период собственных поперечных колебаний корабля отличается от истинного периода волны не меньше чем на 15 %, но при этом необходимо тщательно выполнять все требования морской практики, относящиеся к повороту в условиях шторма.

К моменту перехода положения лагом к волне скорость должна быть возможно большей. Это сократит время пребывания корабля в опасном состоянии, и вследствие роста сопротивления воды колебаниям корабля снизятся амплитуды бортовой качки.

Если же периоды собственных и вынужденных колебаний корабля по крену отличаются друг от друга меньше чем на 15 %, то переход положения лагом к волне исключительно опасен и может быть предпринят только в чрезвычайных ситуациях.

2 Анализ процесса маневрирования для корабля, движущегося лагом к волне

В качестве примера для анализа процесса маневрирования корабля в штормовых условиях рассмотрим корабль, линейная математическая модель движения которого имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\dot{\beta} &= a_{11}\beta + a_{12}\omega + b_1\delta + c_1F; \\ \dot{\omega} &= a_{21}\beta + a_{22}\omega + b_2\delta + c_2M; \\ \dot{\varphi} &= \omega; \\ \dot{\delta} &= u.\end{aligned}\tag{1}$$

Значения рассчитанных коэффициентов линейной математической модели движения корабля приведены в табл. 1.

Бортовая качка представляет собой элементарное вращательное движение корабля относительно продольной оси. Оно характеризуется углом крена и соответствующей проекцией угловой скорости $x_{\text{БК}} = [\theta \omega_x]^T$, которые удовлетворяют уравнению равновесия моментов относительно оси O_x и упрощенному кинематическому уравнению [3, 4]:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_x = J_x^{-1} M_x; \\ \dot{\theta} = \omega_x. \end{cases} \quad (2)$$

Таблица 1. Коэффициенты линейной математической модели движения корабля

Коэффициенты	Значения
a_{11}	-0,009353V
a_{12}	0,6344
b_1	-0,001899V
c_1	0,001537/V
a_{21}	0,0004801V ²
a_{22}	-0,07173V
b_2	-0,0001604V ²
c_2	2,46·10 ⁻⁶

Примечание: V – скорость движения.

Дифференциальное уравнение, описывающее бортовую качку корабля на регулярном волнении с учетом дифракционной части возмущающего момента имеет следующий вид [5, 6]:

$$(I_x + \lambda_{44})\ddot{\theta} + \mu_{44}\dot{\theta} + Dh_0\theta = (M_{x1} - M_{x2})\sin \omega t + M_{x3} \cos \omega t, \quad (3)$$

где M_{x1} , M_{x2} , M_{x3} – амплитуды соответственно главной части возмущающего момента, инерционной и демпфирующей составляющих дифракционной ее части; ω – кажущаяся круговая частота; I_x – главный момент инерции относительно центральной продольной оси корабля; λ_{44} – присоединенный момент инерции при бортовой качке; μ_{44} – коэффициент демпфирующей силы при бортовых наклонениях; D – весовое водоизмещение корабля; h_0 – метацентрическая высота; θ – угол крена корабля.

Пусть $(M_{x1} - M_{x2})\sin \omega t + M_{x3} \cos \omega t = M'_B(t)$ – возмущающий момент. Тогда

$$(I_x + \lambda_{44})\ddot{\theta} + \mu_{44}\dot{\theta} + Dh_0\theta = M'_B(t). \quad (4)$$

Преобразуем это выражение:

$$\frac{(I_x + \lambda_{44})}{Dh_0}\ddot{\theta} + \frac{\mu_{44}}{Dh_0}\dot{\theta} + \theta = \frac{M'_B}{Dh_0}.$$

$$\text{Обозначим } a_2 = \frac{(I_x + \lambda_{44})}{Dh_0}; \quad a_1 = \frac{\mu_{44}}{Dh_0}; \quad M_B(t) = \frac{M'_B}{Dh_0}.$$

Тогда

$$a_2\ddot{\theta} + a_1\dot{\theta} + \theta = M_B(t). \quad (5)$$

После операторного преобразования Лапласа получаем:

$$a_2p^2\theta(p) + a_1p\theta(p) + \theta(p) = M_B(p). \quad (6)$$

Отсюда можно получить передаточную функцию корабля как объекта управления по возмущающему моменту:

$$W_{\theta}^{M_B}(p) = \frac{\theta(p)}{M_B(p)} = \frac{1}{a_2p^2 + a_1p + 1}. \quad (7)$$

Для рассматриваемого фрегата имеем:

$$a_2 = \frac{(I_x + \lambda_{44})}{Dh_0} = \frac{9879,97 + 3306,47}{3850 \cdot 1,22 - 1,00062} = 2,8 \text{ с}^2;$$

$$a_1 = \frac{\mu_{44}}{Dh_0} = \frac{1948,29}{3850 \cdot 1,00062 \cdot 1,22} = 0,41 \text{ с}^2;$$

$$W_{\theta}^{M_B}(p) = \frac{1}{2,8p^2 + 0,41p + 1}. \quad (8)$$

Следовательно, корабль, как объект управления по крену, представляет собой колебательное звено второго порядка. Для исследуемого корабля постоянная времени составляет $T = 1,673$ с, что соответствует резонансной частоте $\omega_{\sigma} = 0,598$ 1/с. Период собственных поперечных колебаний корабля $T_1 = 2\pi T = 10,51$ с. Частотные характеристики корабля по крену приведены на рис. 1.

Дифференциальное уравнение, описывающее килевую качку корабля на регулярном волнении с учетом дифракционной части возмущающего момента имеет вид [4]:

$$(I_y + \lambda_{55})\ddot{\psi} + \mu_{55}\dot{\psi} + DH_0\psi = M_y \sin \omega t, \quad (9)$$

где M_y – амплитуда главной части возмущающего момента; I_y – главный момент инерции массы корабля относительно поперечной оси корабля; λ_{55} – присоединенный момент инерции при килевой качке; μ_{55} – коэффициент демпфирующей силы при килевых наклонениях; D – весовое водоизмещение корабля; H_0 – продольная метацентрическая высота; ψ – угол дифферента корабля.

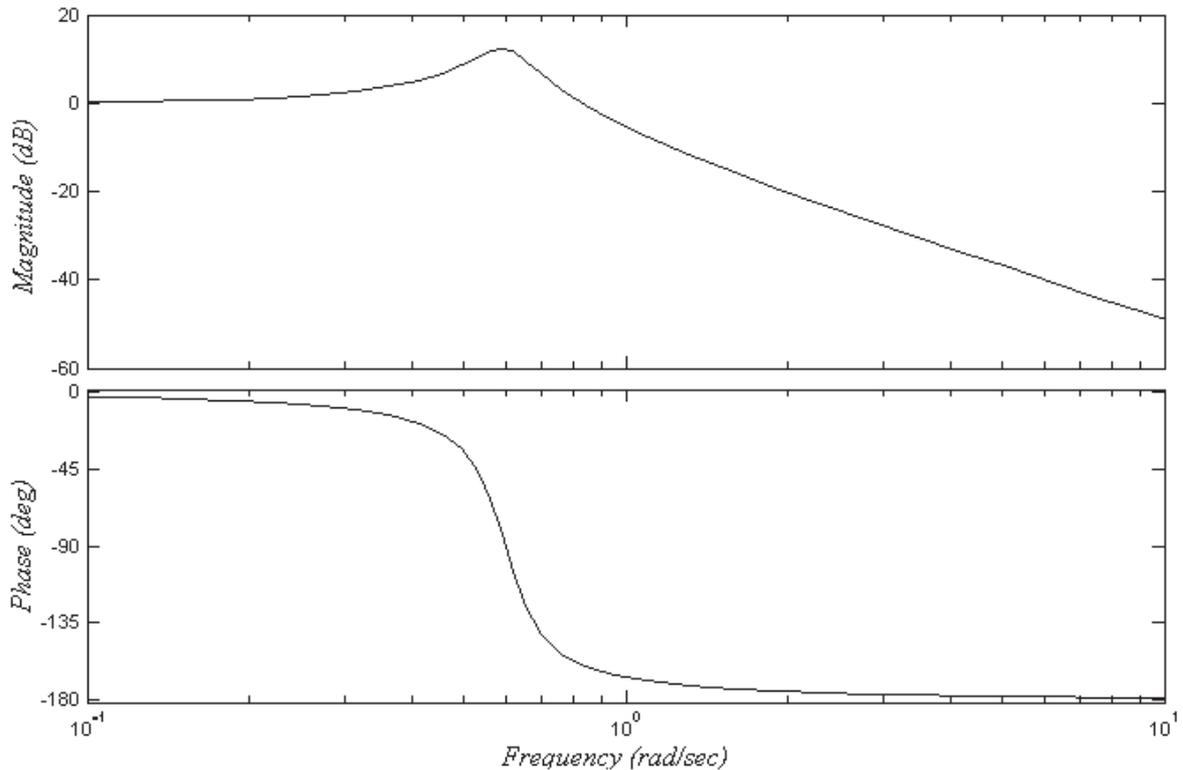


Рис. 1. Частотные характеристики корабля по крену

Пусть $M_y \sin \omega t = M_B''(t)$ – возмущающий момент. Тогда

$$(I_y + \lambda_{55})\ddot{\psi} + \mu_{55}\dot{\psi} + DH_0\psi = M_B''(t). \quad (10)$$

Преобразуем это выражение:

$$\frac{(I_y + \lambda_{55})}{DH_0}\ddot{\psi} + \frac{\mu_{55}}{DH_0}\dot{\psi} + \psi = \frac{M_B''}{DH_0}.$$

Обозначим $b_2 = \frac{(I_y + \lambda_{55})}{DH_0}$; $b_1 = \frac{\mu_{55}}{DH_0}$; $M_B(t) = \frac{M_B''}{DH_0}$.

Тогда

$$b_2\ddot{\psi} + b_1\dot{\psi} + \psi = M_B(t). \quad (11)$$

После операторного преобразования Лапласа получаем:

$$b_2p^2\psi(p) + b_1p\psi(p) + \psi(p) = M_B(p). \quad (12)$$

Отсюда можно получить передаточную функцию корабля как объекта управления по возмущающему моменту:

$$W_{\psi}^{M_B}(p) = \frac{\Psi(p)}{M_B(p)} = \frac{1}{b_2 p^2 + b_1 p + 1}. \quad (13)$$

Для рассматриваемого фрегата имеем:

$$b_2 = \frac{(I_y + \lambda_{55})}{DH_0} = \frac{406594,29 + 140324,29}{3850 \cdot 105 \cdot 1,00062} = 0,65 \text{ с}^2;$$

$$a_1 = \frac{\mu_{44}}{DH_0} = \frac{1948,29}{3850 \cdot 1,00062 \cdot 105} = 0,19 \text{ с}^2;$$

$$W_{\theta}^{M_B}(p) = \frac{1}{0,65 p^2 + 0,19 p + 1}. \quad (14)$$

Следовательно, судно, как объект управления по дифференту, представляет собой колебательное звено второго порядка. Для исследуемого фрегата постоянная времени составляет $T = 0,81$ с, что соответствует резонансной частоте $\omega_0 = 1,234$ 1/с. Период собственных продольных колебаний корабля $T_2 = 2\pi T = 5,1$ с. Частотные характеристики корабля по дифференту приведены на рис. 2.

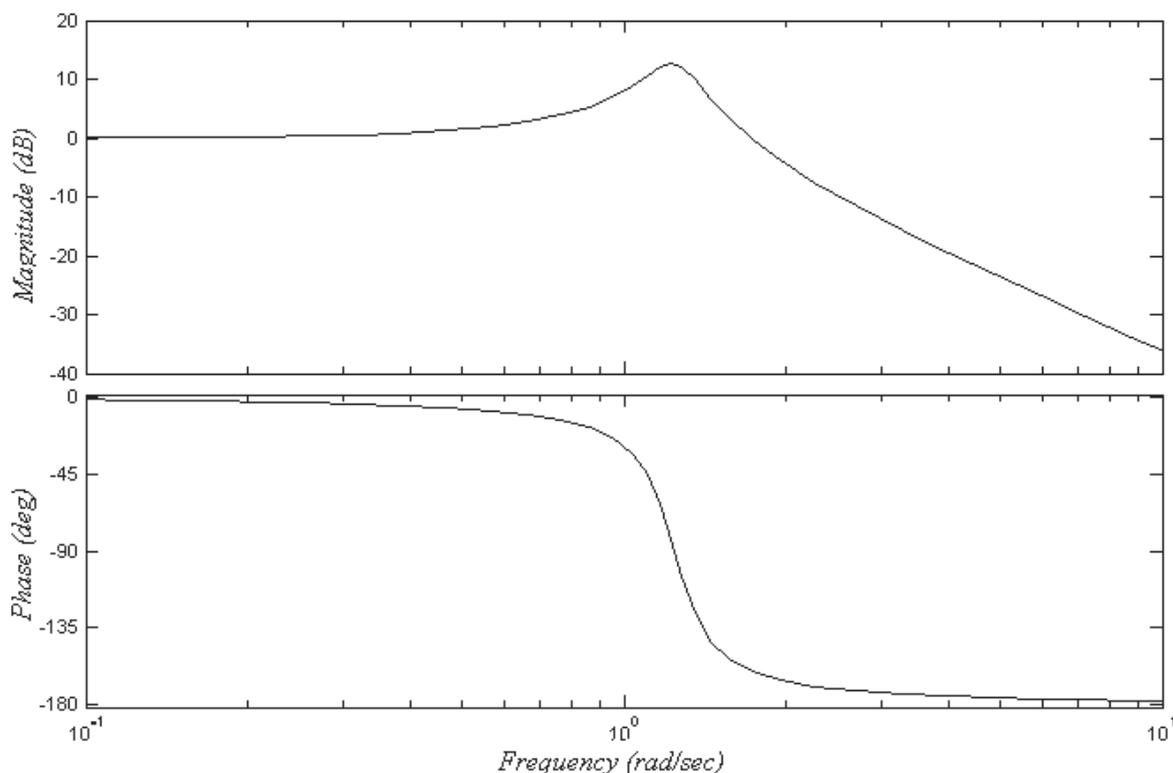


Рис. 2. Частотные характеристики корабля по дифференту

На основании проведенных авторами исследований можно сделать вывод о том, что в первом приближении процесс килевой и бортовой качки корабля описывается дифференциальными уравнениями второго порядка с комплексно-сопряженными корнями. На основании этих уравнений были определены частоты собственных колебаний корабля в продольной и поперечной плоскостях. Сравнивая эти частоты с частотой внешних воздействий, можно принимать решение о наиболее благоприятных курсах и скоростях при маневрировании корабля в условиях шторма.

Дифференциальные уравнения, описывающие бортовую и килевую качки корабля на регулярном волнении, имеют следующий вид [7, 8]:

$$a_2 \ddot{x} + a_1 \dot{x} + x = M_B(t), \quad (15)$$

где $M_B(t)$ – возмущающий момент;

$$(M_{x1} - M_{x2}) \sin \omega t + M_{x3} \cos \omega t = M'_B(t);$$

$$M_B^\theta = \frac{M'_B}{Dh_0};$$

$$M_y \sin \omega t = M''_B;$$

$$M_B^\psi = \frac{M''_B}{DH_0},$$

где M_{x1} , M_{x2} , M_{x3} – амплитуды соответственно главной части возмущающего момента, инерционной и демпфирующей составляющих дифракционной ее части; ω – кажущаяся круговая частота.

Амплитуда главной части возмущающего момента принимается в виде [8]:

$$M_{x1} = D(r - a)k_\theta \alpha_0 \sin \xi, \quad (16)$$

где r – метацентрический радиус; a – возвышение центра тяжести над центром величины; D – весовое водоизмещение корабля; k_θ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние конечных поперечных размеров корабля и курсового угла на величину M_{x1} ; α_0 – максимальный угол волнового склона;

$$r = \frac{\alpha^2 B^2}{11,6 \cdot \delta \cdot T};$$

$$R = \frac{\alpha^2}{14\delta} \cdot \frac{L^2}{T};$$

$$a = z_p - z_\omega;$$

$$z_\omega = \frac{T}{6} \cdot \frac{3\delta + 0,5}{\delta + 0,1}.$$

Вычислим эти параметры для рассматриваемого корабля:

$$\begin{aligned} r &= 1,56; \\ R &= 84,96; \\ a &= z_p - z_\omega; \\ z_\omega &= 2,6; \end{aligned}$$

$$k_\theta = \left\{ \left[\frac{r}{T} - r_1 kT + \left(r_2 - r_1 \frac{z_p}{2T} \right) \cdot (kT)^2 \right] \cdot k_\xi'' - \left[\frac{a}{T} - \left(0,3 - \frac{z_p}{T} \cdot \frac{z_\omega}{T} \right) \cdot kT + \left(0,1 - 0,15 \frac{z_p}{T} \right) \cdot (kT)^2 \right] \cdot k_\xi' \right\} \cdot \frac{T}{r-a}, \quad (17)$$

где k – волновое число, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; k_ξ'' , k_ξ' – коэффициенты, учитывающие влияние курсового угла и определяемые по графикам С. Н. Благовещенского в зависимости от коэффициента полноты α и аргумента $U_1 = \frac{\pi L}{\lambda} \cos \xi$; r_1 и r_2 – коэффициенты, зависящие от соотношения главных размеров, коэффициента полноты χ , определяются по номограммам [8].

Произведем расчет для главной части возмущающего момента M_{x1} для бортовой качки при волнении моря 6 баллов и длине волны 75 м, а также при волнении 3 балла и длине волны 40 м.

Пусть $\xi = 90^\circ$, тогда

$$k_\theta = 0,762; M_{x1} = Dh_0 k_\theta \alpha_0 \sin \xi = 3850 \cdot 1,0062 \cdot 0,762 \cdot 1,22 \cdot 1 \cdot \alpha_0.$$

3 Анализ процесса маневрирования для корабля, движущегося на других курсовых углах к волне

Для других курсовых углов расчеты аналогичны. Результаты расчетов амплитуд главной части возмущающего момента для бортовой качки при волнении моря 6 баллов и длине волн 75 м, при волнении моря 3 балла и длине волн 40 м приведены в табл. 2 и 3. Результаты расчетов амплитуд главной части возмущающего момента для килевой качки при волнении моря 6 баллов и длине волн 75 м, при волнении моря 3 балла и длине волн 40 м приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 2. Амплитуда главной части возмущающего момента для бортовой качки при волнении моря 6 баллов и длине волны 75 м

ξ	0°	45°	90°	135°	180°
M_{x1}	0	$1536,26\alpha_0$	$3601,3\alpha_0$	$1536,26\alpha_0$	0

Примечание:

$\alpha_0 = \frac{h_{3\%} \cdot \omega}{2g}$ – максимальный угол волнового склона ($h_{3\%}$ – высота волны 3% обеспеченности, λ – длина волны);
 $\omega = \frac{2\pi g}{\lambda}$ – частота волнения.

Таблица 3. Амплитуда главной части возмущающего момента для бортовой качки при волнении моря 3 балла и длине волны 40 м

ξ	0°	45°	90°	135°	180°
M_{x1}	0	$1831,14\alpha_0$	$4229,92\alpha_0$	$1831,14\alpha_0$	0

Таблица 4. Амплитуда главной части возмущающего момента для килевой качки при волнении моря 6 баллов и длине волны 75 м

ξ	0°	45°	90°	135°	180°
M_y	$3050,3\alpha_0$	$1398\alpha_0$	0	$1398\alpha_0$	$3050,3\alpha_0$

Таблица 5. Амплитуда главной части возмущающего момента для килевой качки при волнении моря 3 балла и длине волны 40 м

ξ	0°	45°	90°	135°	180°
M_y	$3629,92\alpha_0$	$1631,14\alpha_0$	0	$1631,14\alpha_0$	$3629,92\alpha_0$

Амплитудные значения инерционной составляющей дифракционной части возмущающего момента определяются по следующей зависимости [6]:

$$M_{x2} = k_\beta \cdot \sin \xi \cdot \left[\lambda_{44} \cdot k'_\theta - \left(\frac{1}{k} + z_p \right) \cdot \lambda_{24}^0 \right] \cdot \omega^2 \cdot \alpha_0, \quad (18)$$

где k_β – коэффициент, учитывающий влияние курсового угла, определяется по графику [6] в зависимости от аргумента kT и курсового угла бега волн ξ ; k'_θ – редуцированный коэффициент инерционной составляющей дифракционной части возмущающего момента, вычисляется он по следующей формуле:

$$k' = 1 - 0,148 f_1 \cdot p_1 \cdot s_1 \cdot kT - 0,314 f_2 \cdot p_2 \cdot s_1 \cdot (kT)^2, \quad (19)$$

где $s_1 = 1,95\alpha - 0,36$; $f_1\left(\frac{B}{T}\right)$; $f_2\left(\frac{B}{T}\right)$; $p_2(\chi)$; $p_1(\chi)$ – функции, определяемые по графикам [5];

$$\lambda_{24}^0 = -2,34 \cdot 10^4 \cdot L \cdot B^2 \cdot T \cdot (10\alpha - 6) f_4, \quad (20)$$

где f_4 определяется по графику.

Рассчитаем амплитуды инерционной составляющей дифракционной части возмущающего момента для курсового угла бега волн $\xi = 90^\circ$:

$$s_1 = 0,537; \lambda_{24}^0 = 195,12; f_1\left(\frac{B}{T}\right) = 2,4; f_2\left(\frac{B}{T}\right) = 3,25;$$

$$p_2(\chi) = 1,8; p_1(\chi) = 2,4; k'_0 = 0,061; M_{x2} = 624\alpha_0\omega^2.$$

Результаты расчетов амплитуд инерционной составляющей дифракционной части возмущающего момента для бортовой качки при волнении моря 6 баллов и длине волн 75 м и при волнении моря 3 балла и длине волн 40 м приведены в табл. 6 и 7.

Таблица 6. Амплитуда инерционной составляющей дифракционной части возмущающего момента для бортовой качки при волнении моря 6 баллов и длине волны 75 м

ξ	0°	45°	90°	135°	180°
M_{x2}	0	$810\alpha_0\omega^2$	$2627,54\alpha_0\omega^2$	$810\alpha_0\omega^2$	0

Таблица 7. Амплитуда инерционной составляющей дифракционной части возмущающего момента для бортовой качки при волнении моря 3 балла и длине волны 40 м

ξ	0°	45°	90°	135°	180°
M_{x2}	0	$699\alpha_0\omega^2$	$2152,64\alpha_0\omega^2$	$699\alpha_0\omega^2$	0

Амплитуда демпфирующей составляющей дифракционной части возмущающего момента определяется по формуле:

$$M_3 = \lambda_{44}\alpha_0\omega^2 \cdot \bar{M}_3, \quad (21)$$

где $\bar{M}_3 = (0,56p_3 - 0,76p_4kT)f_3s_2k_\xi$ – величина, характеризующая демпфирующую составляющую возмущающего момента;

$$s_2 = 2,5 \alpha - 0,75;$$

$f_3\left(\frac{B}{T}\right); p_3(\chi); p_4(\chi)$ – функции, определяемые по графикам [5].

Результаты расчетов амплитуд демпфирующей составляющей дифракционной части возмущающего момента для бортовой качки при волнении моря 6 баллов и длине волн 75 м и при волнении моря 3 балла и длине волн 40 м приведены в табл. 8 и 9.

Таблица 8. Амплитуда демпфирующей составляющей дифракционной части возмущающего момента для бортовой качки при волнении моря 6 баллов и длине волны 75 м

ξ	0°	45°	90°	135°	180°
M_{x3}	0	$178,5\alpha_0\omega^2$	$318,1\alpha_0\omega^2$	$178,5\alpha_0\omega^2$	0

Таблица 9. Амплитуда демпфирующей составляющей дифракционной части возмущающего момента для бортовой качки при волнении моря 3 балла и длине волны 40 м

ξ	0°	45°	90°	135°	180°
M_{x3}	0	$92,58\alpha_0\omega^2$	$551,3\alpha_0\omega^2$	$92,58\alpha_0\omega^2$	0

Проанализируем бортовую и килевую качки на примере модели фрегата в виде передаточных функций, полученных выше:

$$W_{\theta}^{M_B}(p) = \frac{\theta(p)}{M_B(p)} = \frac{1}{a_2 p^2 + a_1 p + 1} = \frac{1}{2,8 p^2 + 0,41 p + 1}; \quad (22)$$

$$W_{\psi}^{M_B}(p) = \frac{\psi(p)}{M_B(p)} = \frac{1}{b_2 p^2 + b_1 p + 1} = \frac{1}{0,65 p^2 + 0,19 p + 1}.$$

Объект управления будем рассматривать при регулярном волнении, которое представлено гармоническими колебаниями определенной амплитуды и фазы. Приведенный возмущающий момент по крену:

$$(M_{x1} - M_{x2}) \sin \omega t + M_{x3} \cos \omega t = M'_B(t), \quad (23)$$

где M_{x1} , M_{x2} , M_{x3} – амплитуды соответственно главной части возмущающего момента, инерционной и демпфирующей составляющих дифракционной ее части (определены выше); эти составляющие аппроксимируем следующими выражениями:

$$\begin{aligned}
 M_{x1} &= (-\cos \xi + 1) \cdot \frac{3601,3}{2}; \\
 M_{x2} &= (-\cos \xi + 1) \cdot \frac{2627,54}{2}; \\
 M_{x3} &= (-\cos \xi + 1) \cdot \frac{318,1}{2}.
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

Приведенный возмущающий момент по дифференту:

$$M_z \sin \omega t = M''_B(t),$$

где M_z аппроксимирована выражением:

$$M_z = (\cos \xi + 1) \cdot \frac{3050,3}{2}. \tag{25}$$

Аппроксимации зависимостей составляющих приведенного возмущающего момента от угла встречи с волной приведены на рис. 3.

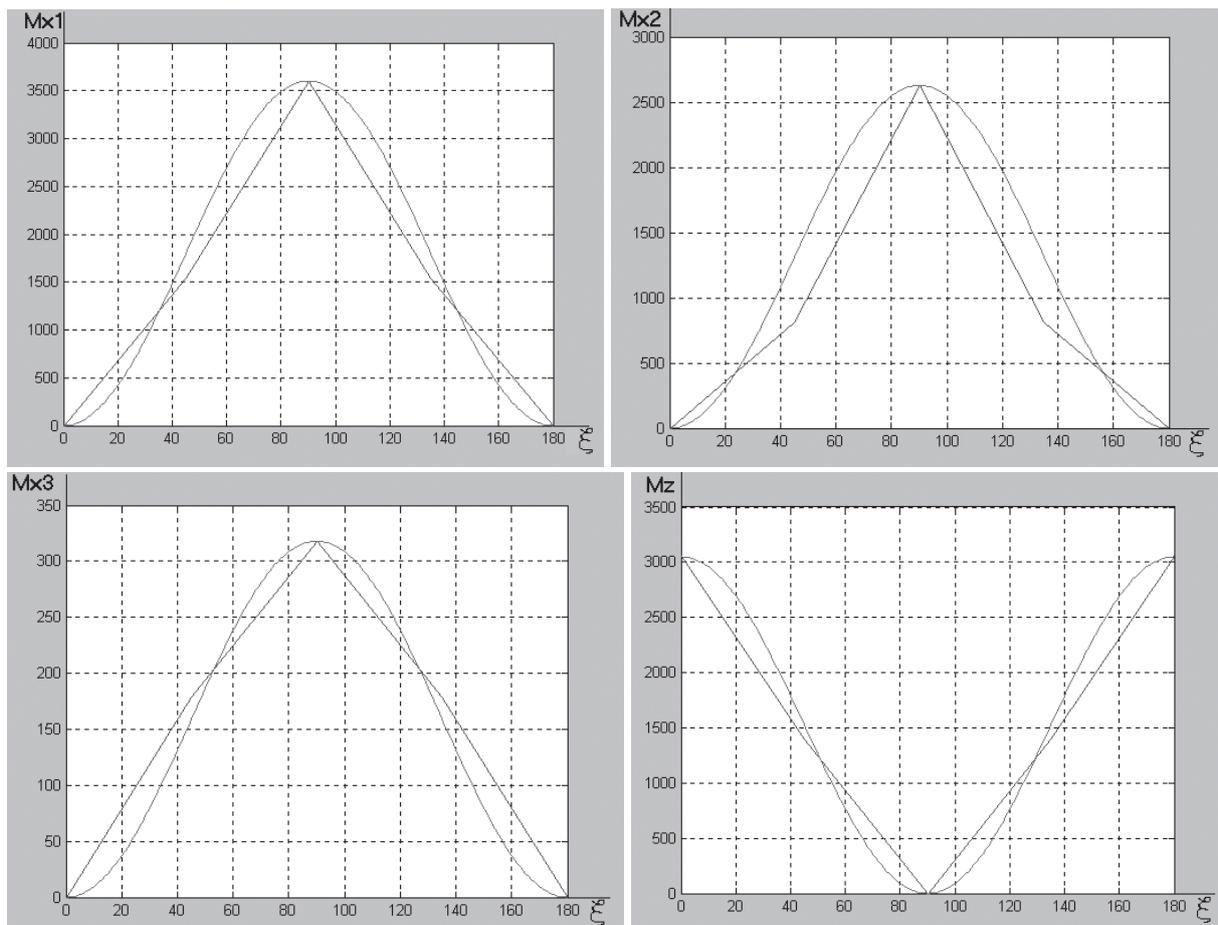


Рис. 3. Аппроксимации зависимостей составляющих приведенного возмущающего момента от угла встречи с волной

Амплитуда угла крена определяется по формуле:

$$\theta_{\max} = |W_{M_B}^{\theta}(j\omega)| \cdot M_B^{\theta}. \quad (26)$$

Амплитуда угла дифферента вычисляется по формуле:

$$\psi_{\max} = |W_{M_B}^{\psi}(j\omega)| \cdot M_B^{\psi}. \quad (27)$$

4 Анализ результатов расчетов изменения угла крена и угла дифферента при изменении угла встречи с волной от 0 до 360°

Рассмотрим изменение амплитуды угла крена и угла дифферента при изменении угла встречи с волной 0–360° при постоянной скорости, равной 8,4 узла, т. е. при циркуляции корабля на волнении 6 баллов с длиной волны 75 м. Результаты расчетов кажущейся частоты волнения, коэффициента передачи объекта управления по крену, амплитуды приведенного возмущающего момента по крену, амплитуды угла крена, коэффициента передачи объекта управления по дифференту, амплитуды приведенного возмущающего момента по дифференту и амплитуды угла дифферента приведены на рис. 4–10 соответственно.

Заключение

Резкое увеличение амплитуды качки в условиях резонанса проявляется особенно ярко при правильном двухмерном волнении, когда волны имеют

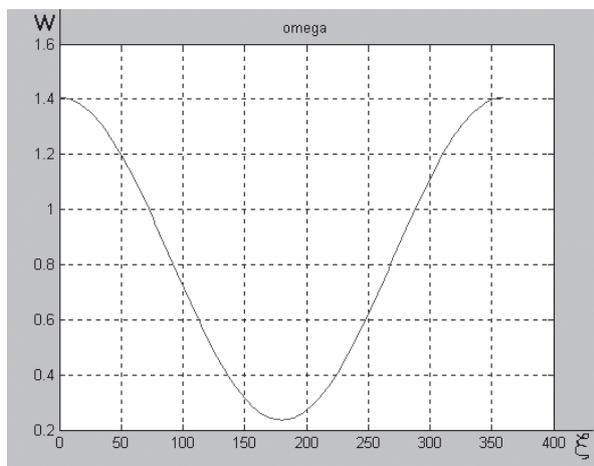


Рис. 4. Кажущаяся частота волнения

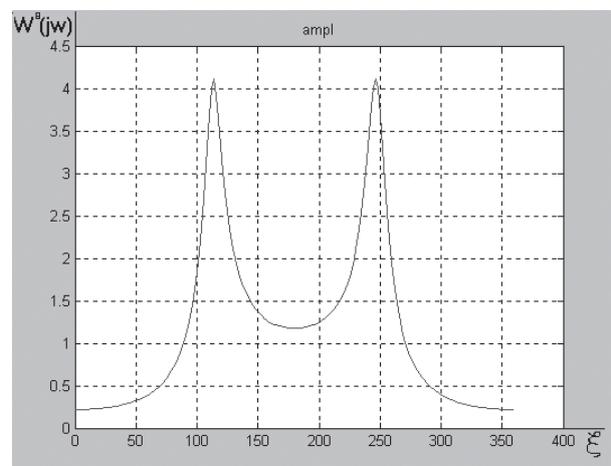


Рис. 5. Коэффициент передачи объекта управления по крену

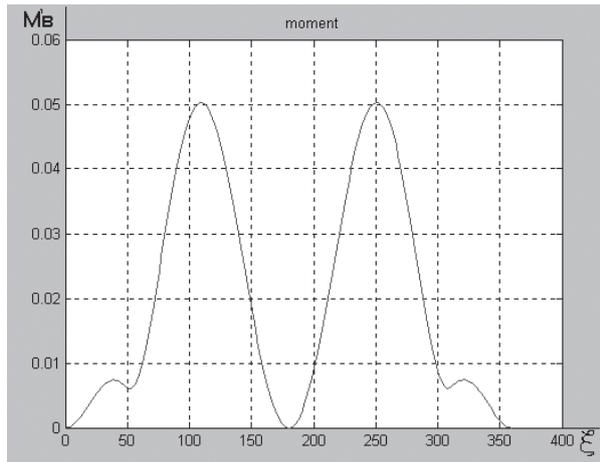


Рис. 6. Амплитуда приведенного возмущающего момента по крену

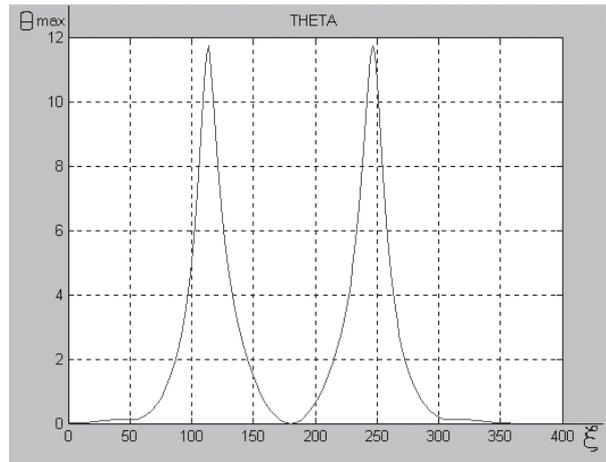


Рис. 7. Амплитуда угла крена

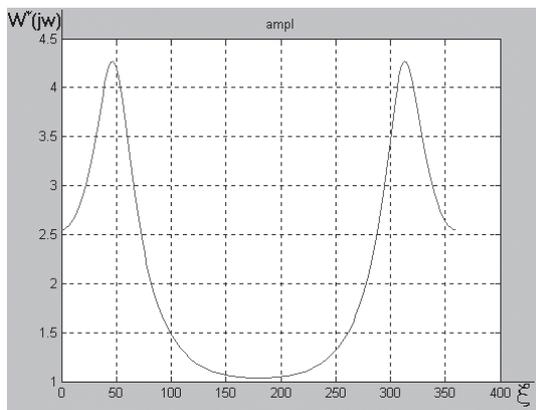


Рис. 8. Коэффициент передачи объекта управления по дифференту

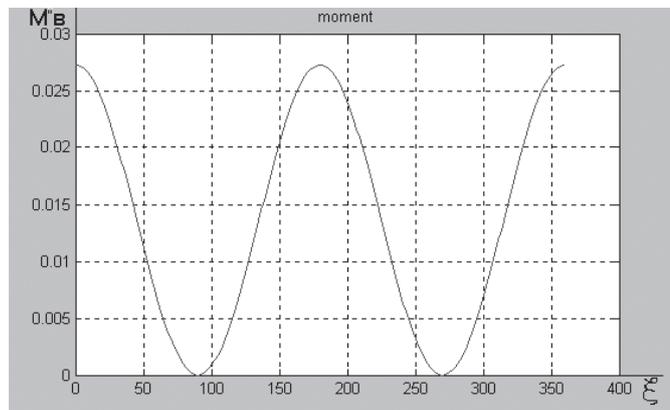


Рис. 9. Амплитуда приведенного возмущающего момента по дифференту

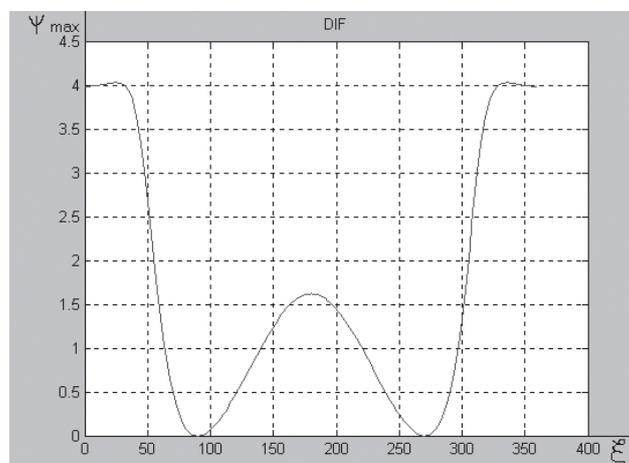


Рис. 10. Амплитуд угла дифферента

вид достаточно длинных валов, следующих на одинаковом расстоянии друг за другом. Поверхность двумерных волн штормовой зыби бывает неровной, покрытой волнами высших порядков, однако последние обладают значительно меньшей энергией, чем основные волны, и поэтому резонанс с волнами высших порядков опасности для судна обычно не представляет. Таким образом, наиболее опасным для судна является попадание в резонанс с основными двумерными волнами штормовой зыби. Как показали исследования, резонанс бортовой качки наступает при курсовых углах волнения $\xi = 180 \pm 45^\circ$, при этом амплитуда угла крена составляет 12° , а резонанс килевой качки наступает при курсовых углах $\xi = 0 \pm 360^\circ$, при этом амплитуда угла дифферента составляет 4° . Таким образом, для того чтобы провести запланированный маневр, необходимо определить, будет устойчив или нет корабль при новых параметрах движения и не будет ли выходить крен за максимально допустимый уровень при новом курсе. Для решения первой задачи сначала необходимо определить область устойчивости, а затем, зная ее, оценить принадлежность вектора переменных состояния этой области. Если он принадлежит этой области и при этом максимальный угол крена не выходит за допустимые пределы, то данный маневр возможен, иначе опасен.

Библиографический список

1. Ремез Ю. В. О выборе курса и скорости корабля при шторме / Ю. В. Ремез. – М. : Морской транспорт, 1957. – 112 с.
2. Скороходов Д. А. Интеллектуализация систем управления безопасностью судоходства / Д. А. Скороходов, Л. Ф. Борисова // Морские интеллектуальные технологии. – 2008. – № 1. – С. 31–34.
3. Лукомский Ю. А. Управление морскими подвижными объектами / Ю. А. Лукомский, В. М. Корчанов. – СПб. : Элмор, 1996. – 320 с.
4. Скороходов Д. А. Построение систем управления движением судна / Д. А. Скороходов, В. М. Корчанов // Морские интеллектуальные технологии. – 2010. – № 3–1. – С. 74–78.
5. Бородай И. К. Качка судов на морском волнении / И. К. Бородай, Ю. А. Нецветаев. – Л. : Судостроение, 1969. – 432 с.
6. Скороходов Д. А. Синтез алгоритмов маневрирования в фазовом пространстве параметров движения / Д. А. Скороходов, Е. А. Овчинникова // Морские интеллектуальные технологии. – 2012. – № 1. – С. 37–39.
7. Басин А. М. Качка судов / А. М. Басин. – М. : Транспорт, 1969. – 272 с.
8. Жинкин В. Б. Теория и устройство корабля / В. Б. Жинкин. – СПб. : Судостроение, 2002. – 336 с.

Ekaterina A. Ovchinnikova,

Scientific-technical center integrated communication systems of surface ships
Closed Joint Stock Company «Design Bureau “RIO”»

Dmitry A. Skorohodov

Institute of transport problems after N.S. Solomenko

Features of vessel turn under the storm conditions

The article determines the features of vessel turn under the storm conditions. Thus the influence of the wave parameters on the vessel evolutions is determined also. As an example linear mathematical model of the movement of surfaced vessel was examined. The paper also determines frequency parameters of the vessel regarding trim and list. It provides the range of disturbing moment for pitch and roll, as well as the inertial component range of diffracting part of disturbing moment for roll. The article gives the dependencies of components of reduced disturbing moment on the wave impact angle and conclusions about the resonance of pitch and roll. It was established, that its is necessary to check the stability of the vessel under new parameters of movement and that listing doesn't exceed maximum allowable limit with this new course should be determined for realisation of predetermined manoeuvre. The article demonstrates that to solve the first problem it is necessary, first of all, to determine the area of stability, and then, knowing it, to estimate the belonging of the vector of variables to this area. If this vector belongs to the are, and at that the maximum list angle is within the allowable limits, so this manoeuvre is possible, otherwise it's dangerous.

amplitude, disturbing moment, wave disturbance, motion, trim difference, inertial component, listing, vessel, manoeuvring, mathematical model, sea, parameters, turn, frequency characteristics, storm conditions, wave impact angle

References

1. Remez Yu. V. O vybore kursa i skorosti korablya pri shtorme [On vessel course and speed selection in storm conditions]. Moscow, Morskoy transport, 1957. – 112 p.
2. Borisova L. F., Skorokhodov D. A. Intellektualizatsiya sistem upravleniya bezopasnost'yu sudokhodstva [Intellectualization of safety management systems for maritime traffic] Morskiye intellektual'nye tekhnologi, 2008, N 1. – Pp. 31–34.
3. Lukomsky Yu. A., Korchanov V. M. Upravleniye morskimi podvizhnymi ob'yektami [Maritime mobile objects management]. St. Petersburg, Elmor, 1996. – 320 p.
4. Skorokhodov D. A., Korchanov V. M. Postroyeniye sistem upravleniya dvizheniyem sudna [Building of vessel movement control systems], Morskiye intellektual'nye tekhnologi, 2010, N 3–1. – Pp. 74–78.
5. Borodai I. K., Netsvetaev Yu. A. Kachka sudov na morskoy volnenii [Vessel motion at confusion on the sea]. Leningrad, Sudostroyeniye (Shipbuilding), 1969. – 432 p.
6. Skorokhodov D. A., Ovchinnikova E. A. Sintez algoritmov manevrirovaniya v fazovom prostranstve parametrov dvizheniya [Synthesis of manoeuvre algorithms within

phase space of motion parameters], Morskiye intellektual'nye tekhnologi, St. Petersburg, N 1 (15), 2012. – Pp. 37–39.

7. Basin A. M. Kachka sudov [Vessel motion]. Moscow, Transport, 1969. – 272 p.

8. Zhinkin V. B. Teoriya i ustroystvo korablya [Theory and configuration of the vessel]. St. Petersburg, Sudostroyeniye (Shipbuilding), 2002. – 336 p.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В. Е. Марлеем
Поступила в редакцию 20.12.2015, принята к публикации 01.02.2016*

ОВЧИННИКОВА Екатерина Александровна – ведущий инженер Научно-технического центра интегрированных комплексов связи надводных кораблей ЗАО «Проектно-конструкторское бюро «РИО»».

e-mail: katto@list.ru

СКОРОХОДОВ Дмитрий Алексеевич – доктор технических наук, профессор, научный сотрудник учреждения Российской академии наук (Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко).

e-mail: skorohodda@mail.ru

© Овчинникова Е. А., Скороходов Д. А., 2016