

- Heave motion – Линейные перемещения при вертикальной качке
- Heave velocity – Линейные скорости при вертикальной качке
- Heave acceleration – Линейные ускорения при вертикальной качке
- Roll motion – Угловые наклоны при бортовой качке
- Roll velocity – Угловые скорости при бортовой качке
- Roll acceleration – Угловые ускорения при бортовой качке
- Pitch motion - Угловые наклоны при килевой качке
- Pitch velocity – Угловые скорости при килевой качке
- Pitch acceleration – Угловые ускорения при килевой качке

Дименсии линейных и угловых перемещений, скоростей и ускорений показаны в колонке **units**.

4.2 Формулы для расчета

4.2.1 Формулы для трансферных функций

RAO / Response Amplitude Operator or transfer functions /- Характеристика Амплитудного Оператора /или трансферна функция/

В русской технической литературе: „передаточная функция“.

Средне-квадратичные величины спектра **RMS** получают по дисперсию:

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega \quad \text{или} \quad m_0 = \int_0^{\infty} S(\omega_e) d\omega_e$$

ω – частота волнения; ω_e – кажущаяся частота волнения /encounter frequency/

$S(\omega)$ или $S(\omega_e)$ – плотность спектра по интересам

A. Трансферная функция вертикальных линейных перемещений:

$$RAO_z = Z_0 / \zeta_0$$

Z_0 – амплитуда функции вертикальных линейных перемещений выбранной /фиксированной/ точки судна в зависимости от частоты волнения

ζ_0 - амплитуда функции вертикальных линейных перемещений волновых частиц в зависимости от частоты волнения /амплитуда волнения/

Если вместо ω имеем ω_e тогда трансферная функция имеет следующий вид:

$$RAO_z(\omega_e) = Z_0(\omega_e) / \zeta_0(\omega_e)$$

$Z_0(\omega_e)$ – вертикальные перемещения точек судна в функции от кажущуюся частоты волнения

$\zeta_0(\omega_e)$ - вертикальные перемещения волновых частиц в функции от кажущуюся частоты волнения

Тогда формула спектральной плотности дисперсии линейных вертикальных перемещений при вертикальной качке на нерегулярном волнении будет следующая:

$$S_z(\omega_e) = RAO_z(\omega_e)^2 \cdot S_\zeta(\omega_e)$$

$S_\zeta(\omega_e)$ – энергетический спектр волнения /спектральная плотность/ в функции от кажущуюся частоты волнения

Б. Трансферная функция угловых наклонов при бортовой качке:

$$RAO_\theta = \theta_0 / k \cdot \zeta_0$$

θ_0 – амплитуда функции углов наклона точки судна в зависимости от частоты волнения

ζ_0 - амплитуда функции вертикальных линейных перемещений волновых частиц в зависимости от частоты волнения /амплитуда волнения/

$k = \omega^2 / g$ - коэффициент перевода /волновое число/

В. Трансферная функция вертикальных ускорений:

$$RAO_A = a_0 / (\omega_e^2 \cdot \zeta_0)$$

a_0 – амплитуда функции вертикальных ускорений выбранных точек судна в зависимости от кажущуюся частоту волнения

ω_e - кажущаяся частота волнения

ζ_0 - амплитуда функции вертикальных линейных перемещений волновых частиц в зависимости от частоту волнения /амплитуда волнения/

4.2.2 Дополнительное волновое сопротивление определяется по формуле:

$$R_{aw} = 2 \cdot \int_0^{\infty} C_{aw} \cdot S_{\zeta}(\omega_e) d\omega_e$$

Коэффициент дополнительного волнового сопротивления при регулярном волнении:

$$C_{aw} = R_{aw} / \zeta_0^2$$

$S_{\zeta}(\omega_e)$ —энергетический спектр волнения в функции от кажущуюся частоту волнения

Спектр дополнительного волнового сопротивления:

$$S_{aw}(\omega_e) = 2 \cdot C_{aw}(\omega_e) \cdot S_{\zeta}(\omega_e)$$

Примечание: Все формулы в т.4 цитированы из мануала программы “Maxsurf Motions Advanced”, v.23.02 от 2021

Для сравнения с аналогичными формулами и обозначениями величин с их дименсиями в русской научно-технической литературе, посмотрите на скриншот от стр.91 из книги Благовещенского и Холодилина „Справочник по статике и динамике корабля“-1975, том 2- & 10. Бортовая качка на нерегулярном волнении и & 17. Расчет продольной качки судна на нерегулярном волнении –стр.129 и 130.

Формулы для расчета трансферных /передаточных/ функций и спектральной плотности перемещений, скоростей и ускорений при вертикальной и бортовой качке можно посмотреть также и на стр.39 и 40 из книги Холодилина и Шмырева „Мореходность и стабилизация судов на волнении“-1976 и в & 24, стр.278-297 Качка многокорпусных судов в той же книге.

Заслужает внимания и следующая цитата из книги Холодилина и Шмырева-стр.305:

„ Наиболее распространенным средством успокоения продольной качки катамаранов является подводное крыло, расположенное между корпусами в носовой оконечности судна.“

Спектральные плотности перемещений, скоростей и ускорений вертикальной качки определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} S_{\xi_g} &= |\Phi_{\xi_g}|^2 S_{\xi}; & S_{\dot{\xi}_g} &= \sigma^2 S_{\xi_g}; \\ S_{\ddot{\xi}_g} &= \sigma^2 S_{\dot{\xi}_g}, \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

где S_{ξ_g} — спектральная плотность перемещений вертикальной качки, $\text{м}^2 \cdot \text{с}$; $S_{\dot{\xi}_g}$ — спектральная плотность скоростей, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; $S_{\ddot{\xi}_g}$ — спектральная плотность ускорений, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$.

В формулах (3.15) и (3.16) передаточные функции выражены через параметр волны r_w , т. е. полувысоту волны. Об этом свидетельствует первый индекс ξ , второй индекс ξ_g и ξ_g указывают, к какому движению относится рассматриваемая передаточная функция.

При выполнении расчетов бортовой качки следует предварительно перевести спектральную плотность волнения по высотам на спектральную плотность по углам волнового склона (r_w на α_0). Для этого используется известная зависимость теории волн малой амплитуды

$$\alpha_0 = k r_w = \frac{\sigma^2}{g} r_w.$$

Тогда спектральная плотность волнения, выраженная через углы волнового склона, может быть записана в следующем виде:

$$S_{\alpha} = \frac{\sigma^4}{g^4} S_{\xi} \cdot (57,3)^2, \text{ град}^2 \cdot \text{с}. \quad (3.17)$$

Соответственно спектральные плотности наклонения, скоростей и ускорений имеют вид

$$\begin{aligned} S_{\theta} &= |\Phi_{\alpha\theta}|^2 S_{\alpha}, \text{ град}^2 \cdot \text{с}; \\ S_{\dot{\theta}} &= \sigma^2 S_{\theta}, \text{ град}^2 \cdot \text{с}^{-1}; & S_{\ddot{\theta}} &= \sigma^2 S_{\dot{\theta}}, \text{ град}^2 \cdot \text{с}^{-2}. \end{aligned}$$

Дисперсия любого процесса определяется формулой

$$D_x = \int_0^{\infty} S_x d\sigma,$$