

ФИЛЬТРАЦИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НАГРУЗКИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ
ВРШ НА ВОЛНЕНИИ

В современных системах дистанционного автоматизированного управления (ДАУ) винтом регулируемого шага (ВРШ) при изменении нагрузки на винт реакция контуров регулирования частоты вращения n и управления шагом винта H определяется действием регулятора нагрузки (РН), связывающего оба контура в единую динамическую систему.

Эффективность таких регуляторов нагрузки достаточно высока [1], но в пределах умеренного волнения. В условиях штормового волнения действие РН представляет достаточно серьезную проблему для устойчивой работы главного двигателя. Ввиду того, что отслеживая мгновенное изменение момента сопротивления M_p , изменяющегося по причине качки судна, регулятор частоты вращения (РЧВ) двигателя постоянно меняет координату топливоподачи, которая также является входным воздействием и для РН, который в свою очередь воздействует на контур изменения шага.

В силу запаздывания по фазе и значительной инерционности контура управления шагом, фактическое изменение мощности двигателя от изменения H происходит как реакция на некоторое усредненное воздействие от колебательного характера реакции регулятора, в свою очередь соответствующей частоте волнения. Такой характер воздействия на двигатель – колебательное от изменения топливоподачи (от РЧВ) и затем шага (от РН) приводит к нестабильному режиму нагружения двигателя.

В условиях же нерегулярного волнения фактически несинхронные действия обоих контуров (РЧВ и шага) приводят к достаточно резким колебаниям мощности, что дает обратный эффект от применения РН.

Соответственно, на практике в условиях даже доштормового волнения во многих случаях РН выключают. Так как на суда в основном идет поставка типовых РН в комбинации с ДАУ ВРШ, то задача стабилизации режимов двигателя видится в поиске методов некоторого осреднения или сглаживания воздействия нагрузки, дающего возможность РЧВ и контуру изменения шага и РН стабилизировать воздействие в условиях хотя бы умеренного волнения.

Цель статьи – обоснование применения в системах ДАУ ВРШ с РН необходимых элементов демпфирования (фильтрации) воздейст-

вия нагрузки от морского волнения с целью снижения влияния частоты его колебаний и обеспечения большей стабильности работы главного двигателя в условиях волнения.

В комбинаторных системах ДАУ ВРШ командный сигнал из рулевой рубки поступает в комбинатор в блоке логики (рис. 1, а), где он разделяется на команду задания шагового отношения $H_{\text{зад}}$ и на команду задания частоты вращения $n_{\text{зад}}$. Эти команды принимаются соответственно вспомогательным сервомотором механизма изменения шага (МИШ) и РЧВ. Диаграмма комбинированное управления шагом и частотой вращения (рис. 1, з) "привязана" к положению рукоятки управления (ПРУ), при этом диапазон изменения шага определяется прямыми G и H , при которых обеспечиваются максимальный упор винта на швартовах и режимы длительной эксплуатационной и максимальной мощности.

Обычно комбинированное управление на ходе "вперед" распространяется только на область маневровых и частичных режимов ($\text{ПРУ} \leq 8$); при дальнейшем увеличении нагрузки на шаг винта прекращается и на режимах полного хода ($\text{ПРУ} \geq 8$) дизель работает на характеристике ВФШ: $H = (H_p / D_p)_{\text{max}} = 0,95$.

Контур задания шага представляет собой следящую систему с обратной связью (рис. 1, б); РЧВ (рис. 1, в) обычно имеет пропорционально-интегральный закон управления.

Регулятор нагрузки (рис. 2) призван обеспечить работу двигателя по программе, в основу которого положена зависимость текущей координаты топливоподачи F от фактической частоты вращения гребного вала, т.е. $F = f(n_p)$. При этом принимается, что координата F прямо пропорциональна эффективному моменту на валу M_e . Так как эффективная мощность $N_e \sim M_e \cdot n$, то РН реализует программу, при которой мощность N_e представляется в функции частоты вращения (рис. 2, б). В отличие от функции защиты (рис. 3, а) при изменении нагрузки (например, в условиях волнения) РН должен изменять положение лопастей (шаг) ВРШ таким образом, чтобы заданное значение (уставка нагрузки) координаты F соответствовало $f(n)$, но при этом сохранялось значение мощности дизеля (рис. 3, б).

Следует уточнить, что под координатой F (Fullung – нем., Rack position, Fuelling, Setting of the fuel pump – англ.) опосредствованно принимается цикловая подача топлива.

Примем, что координата F – это положение рейки топливных насосов высокого давления (ТНВД, в отдельных системах датчик координаты F подключен не к рейке ТНВД, а к выходному валу РЧВ [4]).

Изменение момента сопротивления винта M_p следует за изменением

характеристик качки судна (за основное воздействие принимается килевая качка) и практически с той же частотой [2]. Последствия воздействия волнения (качки) определяются многими факторами, в том числе

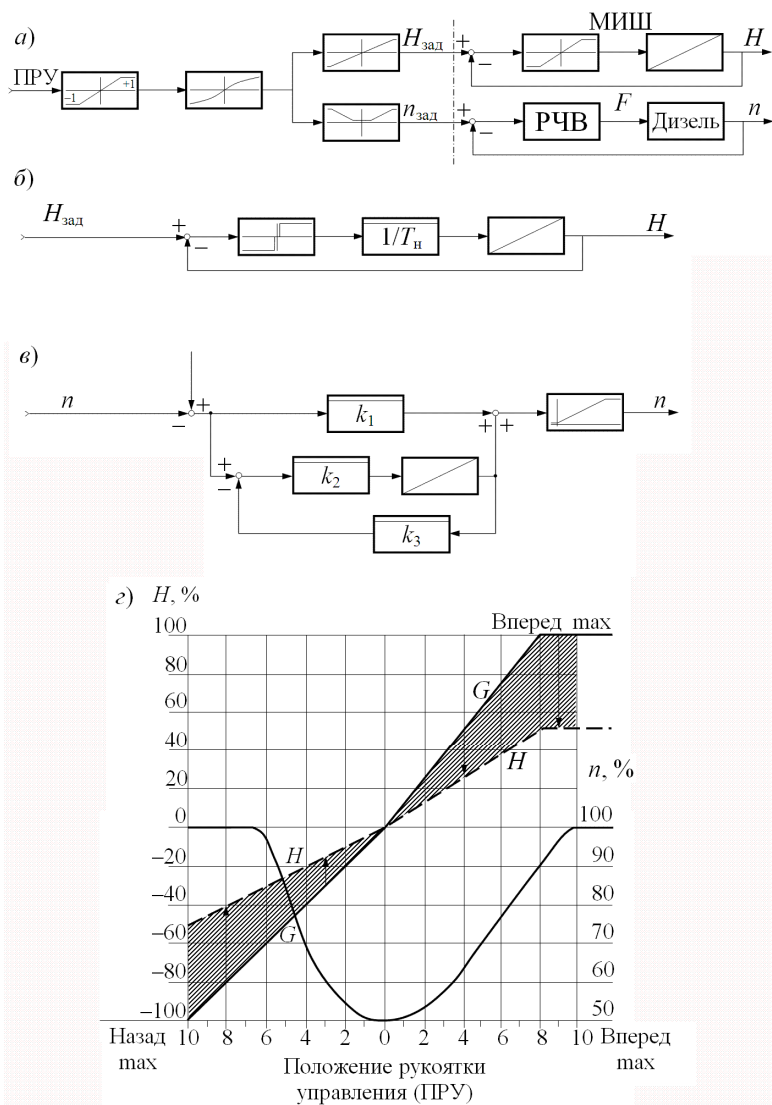


Рис. 1. Схема комбинаторного задания режима в ДАУ ВРШ

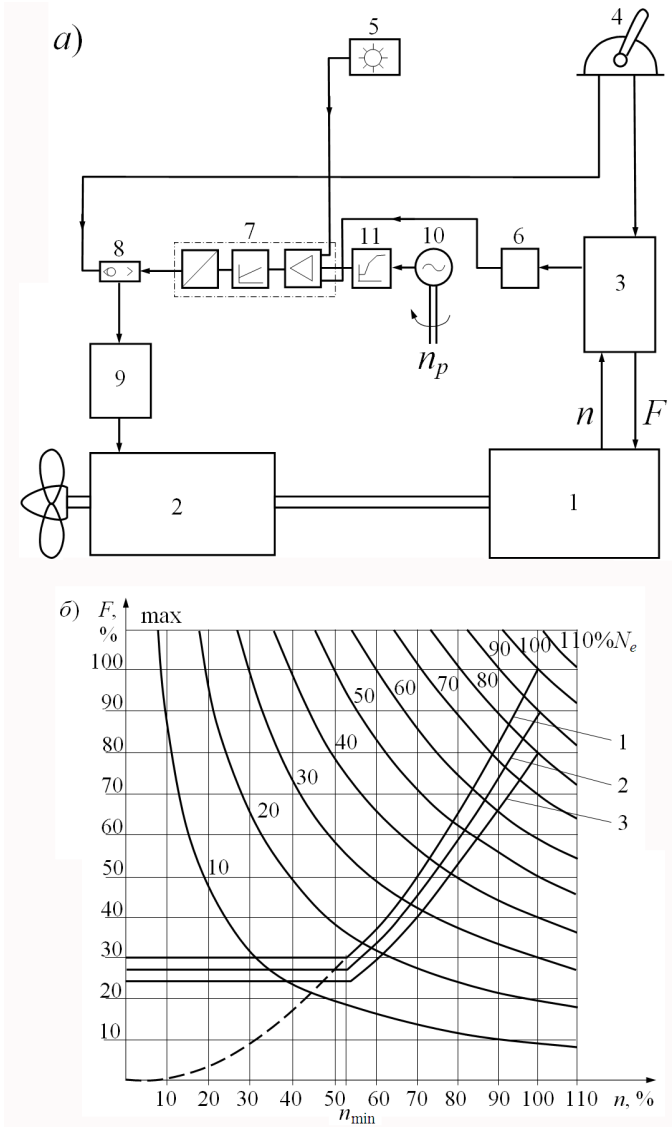


Рис. 2. Регулятор нагрузки: а – принципиальная схема; б – характеристика; 1 – главный двигатель; 2 – механизм изменения шага ВРШ; 3 – РЧВ + ТНВД; 4 – рукоятка управления; 5 – ограничитель нагрузки; 6 – датчик положения рейки ТНВД; 7 – регулятор нагрузки; 8 – координатор выбора шага; 9 – корректирующий сервомотор; 10, 11 – датчик частоты вращения гребного вала

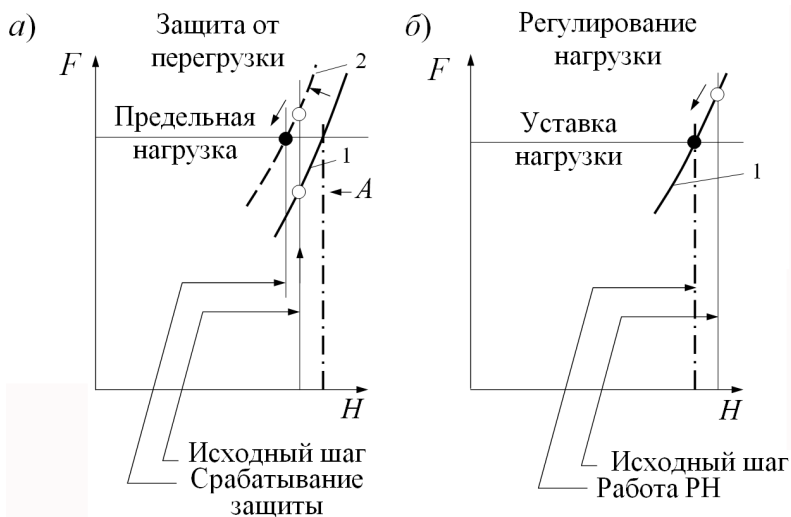


Рис. 3. Схема управления шагом в ДАУ ВРШ: *a* – защита двигателя от перегрузки; *б* – регулирование нагрузки; 1 – номинальная (рабочая) винтовая характеристика; 2 – утяжеленная винтовая характеристика; *A* – рабочая точка

и инерционными характеристиками пропульсивного комплекса, а при работе РЧВ и РН также характеристиками контуров управления частоты вращения и шага. Постоянные времени элементов пропульсивного комплекса и элементов системы управления обычно составляют: корпус – 120 с ... 15 мин; двигатель с редуктором – 10 ... 15 с; контур РЧВ – 0,4 ... 0,8 с; ТНВД (координата F) – 0,5 ... 1 с; отработка шага следящей системой изменения шага ВРШ (условная постоянная времени) – 10 ... 20 с.

В условиях морского волнения период волны может колебаться от 3 до 20 с. Соответственно, РЧВ реагирует на каждое изменение амплитуды качки (а также волны за кормой), изменяя координату F (топливоподачу). Теоретически команда от РН (электронного) на изменение шага следует за изменением координаты F , однако по причине большей (на порядок выше) инерционности контура шага при его отработке на разворот лопасти, к нему поступает несколько команд от РН, тем самым последующее изменение мощности является фактически реакцией на неопределенное по форме и значению воздействие.

В условиях же нерегулярного волнения фактически несинхронные действия обоих контуров (РЧВ и ТНВД и шага) приводят к достаточно резким колебаниям мощности (рис. 4), что дает отрицательный для двигателя эффект от применения РН.

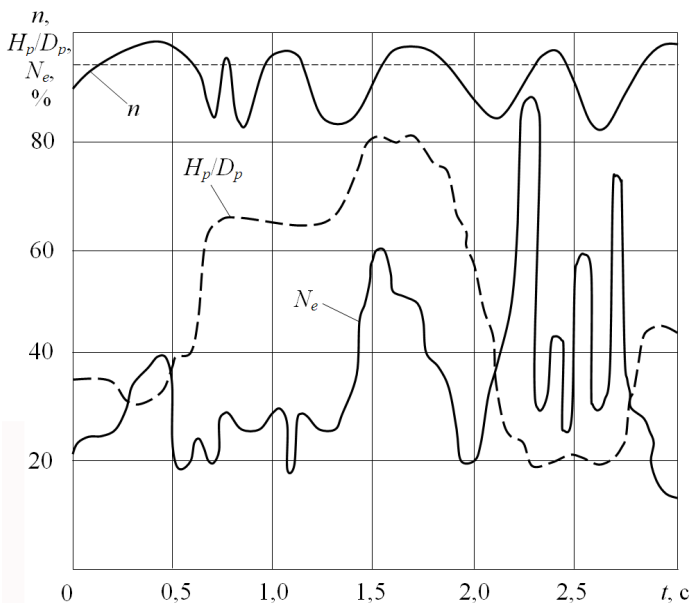


Рис. 4. Изменение мощности на валу дизеля R32BC и шага ВРШ (теплоход "Измаил") при нерегулярном волнении: n – частота вращения вала; N_e – мгновенная мощность; H_p/D_p – шаговое отношение ВРШ (работа РН)

Выход видится в применении некоторого осреднения воздействия нагрузки, дающего возможность контуру изменения шага приблизиться к своей роли (осуществить конечный переходный процесс) в условиях хотя бы умеренного волнения.

Практически это возможно введением элемента искусственной нечувствительности или "фильтра" колебаний возмущений в электронной связи между перемещением рейки ТНВД и РН [3].

Если движение масс рейки и ТНВД описать уравнением второго порядка, преобразовав его к виду

$$\ddot{x} + a_1 \dot{x} + a_2 x = k_R u,$$

где x – координата перемещения, соответствующая F ; k_R – передаточный коэффициент воздействия u от РЧВ; a_1 , a_2 – коэффициенты; u – условное задание от РЧВ, – то его решение при $u = 1$

$$x = e^{\alpha t} (c_1 \sin \beta t + c_2 \cos \beta t) + \frac{k_R}{a_2},$$

где $\alpha = a_1/2$; $\beta = \sqrt{a_2 - a_1^2/4}$; c_1 , c_2 – постоянные коэффициенты; t –

время.

При нулевых начальных условиях

$$x = x_0 + x_0 e^{\alpha t} \left(\frac{\alpha}{\beta} \cdot \sin \sqrt{\alpha^2 - a_2 \tau} - \cos \sqrt{\alpha^2 - a_2 \tau} \right).$$

Выражение $x_0 \cdot e^{\alpha t}$ описывает огибающую переходного процесса системы масс рейки и ТНВД, поэтому для приближенной оценки длительности процесса достаточно провести анализ уравнения $x' = x_0 \cdot e^{\alpha t}$.

Если принять, что окончание переходного процесса – момент входа координаты x в зону допустимой неустойчивости, например, в прямолинейную дорожку в 5 %, то для оценки его длительности достаточно рассмотреть выражение $x_0 \cdot e^{\alpha t} \geq 0,025x_0$.

Логарифмируя, получим $\alpha t \geq -3,7$, откуда

$$\tau_{\text{дд}} \geq -\frac{3,7}{\alpha}.$$

Последнее выражение показывает, что предельное быстродействие системы при сохраняющейся аperiodичности определится только демпфирующими качествами ТНВД и рейки и при их малых значениях (дизели мощностью до 2,0 ... 2,5 тыс. кВт), тем самым изменение координаты F в полной мере зависит от частоты входного воздействия.

Тем самым, для исключенных (уменьшения) колебаний мощности двигателя в структуру главного двигателя с ДАУ ВРШ (рис. 5) следует ввести фильтр 2 с зоной нечувствительности 1,5 ... 2,0 %, исключая воздействия частот колебаний координаты F , меньших по периоду, чем $\tau_{\text{дд}}$.

Координата F теоретически должна соответствовать суммарной цикловой подаче топлива на двигатель $b_{\delta\Sigma} = V_{\text{нн}} \cdot n_{\text{нн}} \cdot i_{\text{цл}}$, где $V_{\text{тн}}$ – объем впрыснутого топлива за активный ход плунжера ТНВД; $n_{\text{тн}}$ – частота вращения вала ТНВД ($n_{\text{тн}} = n$ для двухтактных дизелей, $n_{\text{тн}} = 0,5n$ – для четырехтактных); $i_{\text{цл}}$ – число цилиндров.

Объем впрыснутого топлива пропорционален ходу рейки (примем ее как координату F) и коэффициенту подачи $\eta_{\text{п}}$ ТНВД $V_{\text{нн}} = F \cdot \eta_{\text{п}}$. Соответственно, часовой расход топлива $B_{\pm} = \rho_{\text{н}} \cdot F \cdot \eta_{\text{п}} \cdot n_{\text{нн}} \cdot i$. В относительных переменных $\bar{B}_{\pm} = \bar{F} \cdot \bar{n}$. Следовательно, координата

$$\bar{F} = \frac{\bar{B}_{\pm}}{\bar{n}}.$$

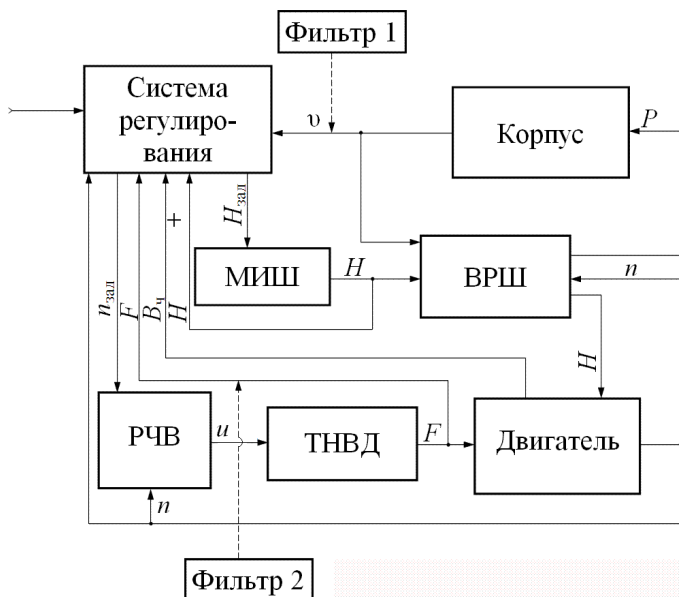


Рис. 5. Схема включения фильтров в систему ДАУ ВРШ с регулятором нагрузки

Имея ввиду, что $\bar{B}_+ = \bar{N}_e \cdot \bar{b}_e = \bar{M}_e \cdot \bar{b}_e \cdot \bar{n}$, $\bar{F} \approx \bar{M}_e \cdot \bar{b}_e$, где \bar{b}_e – удельный эффективный расход топлива.

В режимах нерегулярного волнения в отличие от установившихся режимов (стендовые условия), где имеется явный минимум b_e (рис. 6), форма изменения b_e , вычисленная по модели [5], такого экстремума не имеет и в пределах работы РН по изменению шага от 0,6 до 0,95 зависимость $b_e = f(H)$ практически линейна [6].

Соответственно, для режимов волнения можно принять соотношение $\bar{M}_e \approx \bar{F}$.

Тем самым сглаживанием колебаний команд от изменения координаты F обеспечивается большая стабильность вращающего момента двигателя, что в свою очередь определяется большей стабильностью рабочего процесса в цилиндрах.

Согласно своего назначения РН обеспечивает автоматическую коррекцию шага по фактической частоте вращения, которая в свою очередь определяется изменением момента сопротивления при качке судна. Соответственно, структура типового РН не позволяет ставить

задачу поиска рационального (прежде всего, по критерию топливной экономичности) режима работы главного двигателя.

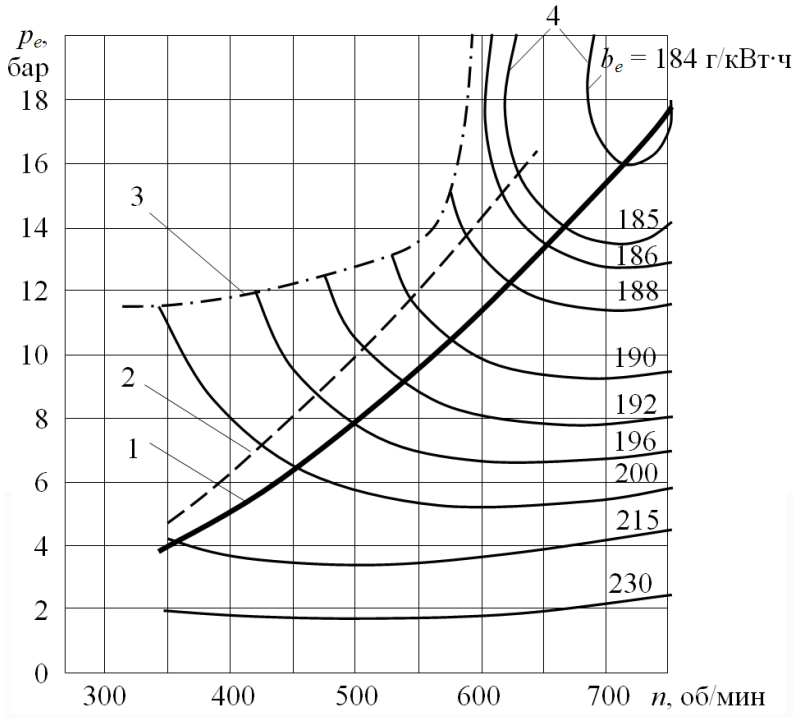


Рис. 6. Статические характеристики главного двигателя: 1 – номинальная винтовая характеристика; 2 – утяжеленная при волнении; 3 – граница помпажа; 4 – характеристики $b_e = \text{const}$

Момент сопротивления гребного винта \bar{M}_p при качке можно описать приближенно формулой $\bar{M}_p \approx \bar{P}$, где P – мгновенный упор судна.

Так как упор судна при $F = \text{const}$ в полной форме следует изменению сопротивления $\bar{R} = (\bar{v})^\alpha$, то можно принять $\bar{M}_p \approx (\bar{v})^\alpha$. Тогда, в соответствии с функциональным назначением регулятора нагрузки изменение координаты F должно соответствовать $\bar{F} \approx (\bar{v})^\alpha$.

Момент сопротивления винта в упрощенном виде является функ-

цией погружения оси гребного винта, т.е. определяется параметрами качки судна и параметрами волны в корме. Результатом действия волнения на судно является непреднамеренная потеря скорости. При регулярном волнении эту потерю можно оценить предварительно по эмпирическим формулам, если заранее известны параметры волнения; высота волны 3 %-ной обеспеченности, отношение длины волны к длине судна, скорость судна. Однако, эти формулы дают значительные погрешности при основном виде волнового возмущения – нерегулярном волнении.

Потеря скорости судна от действия нерегулярного волнения будет определяться величиной от воздействия центральной (максимальной по амплитуде) волны пакета; на эту величину основной потери в виде "помех" накладывается воздействие локальных амплитуд волнового пакета.

Для корректной постановки задачи прогнозирования и выбора рационального режима в обоих случаях необходимо иметь в расчете одну определяющую амплитуду максимальной обеспеченности и исключить влияние остальных как "белый шум".

Поведение судна в условиях волнения обычно рассматривается относительно неподвижной $O - XYZ$ и подвижной с центром в центре тяжести судна $G - xyz$ систем координат; судно движется со скоростью v навстречу регулярной волне с длиной λ_w и высотой h_w (рис. 7). В условиях тихой воды центры обеих систем O и G совпадают.

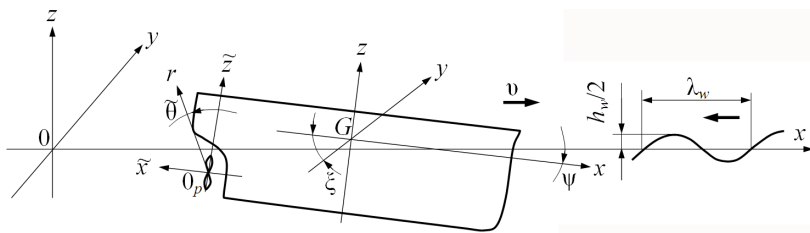


Рис. 7. Система координат поведения судна на волнении

Соответственно, при косинусоидальной (синусоидальной) форме регулярной волны, наблюдаемая скорость судна вдоль оси $0x$ определяется из выражения:

$$X(x, z, \omega, u, t) = A(\omega, u) \cdot e^{kz} e^{i(\omega t - kx)}, \quad (1)$$

где $A(\omega, u)$ – амплитуда волнения, $A = h_w/2$; $k = 2\pi/\lambda_w$ – волновое

число; h_w, λ_w – высота и длина волны; $\omega = \sqrt{kg}$ – частота волны; z – вертикальная координата волны; x – горизонтальное перемещение судна; u – скорость ветра.

Представим координату x движения судна в виде $x = x_0 + v t \cos \beta$, где β – курсовой угол встречи волн; x_0 – отстояние судна от точки начала движения до встречи с волной максимальной обеспеченности или с волновым пакетом.

Тогда комплексный показатель степени в выражении (1) можно представить в виде $i(\omega t - kx) = i(\omega - kv \cos \beta)t - kx_0 = i(\omega_e t + \varphi)$, где $\varphi = -kx_0$ – фазовый угол; $\omega_e = \omega - kv \cos \beta$ – кажущаяся (наблюдаемая) частота волнения,

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2}{g} v \cos \beta. \quad (2)$$

Решая квадратное уравнение (2) при условиях: $\omega \neq 0, v \neq 0, \cos \beta \neq 0, -$

$$\omega^2 - \frac{g}{v \cos \beta} \omega + \frac{g}{v \cos \beta} \omega_e = 0,$$

получим

$$\omega_{1,2} = \frac{g}{2v \cos \beta} \pm \sqrt{\left(\frac{g}{2v \cos \beta}\right)^2 - \frac{4g}{v \cos \beta} \omega_e}.$$

Соответственно, имеют место два случая:

а) $\cos \beta > 0$ (попутное волнение); т.к. аргумент под корнем не может быть отрицательным, следовательно $\omega_e \leq 4v \cos \beta = \omega_{\text{адн}} (\cos \beta > 0)$, $\omega_{\text{гран}}$ – частота, при которой волна обгоняет судно.

б) $\cos \beta < 0$ – встречное волнение, при котором имеет место наибольшая потеря скорости (является расчетным случаем).

Дифференцируя выражение (1) с подстановкой (2), получим уравнение скорости:

$$V(\omega_e, \omega, t) = \omega_e A(\omega) i \cdot e^{kz} e^{i(\omega_e t + \varphi)}. \quad (3)$$

Соответственно, значимая амплитуда изменения скорости определится из (3):

$$\bar{V}(\omega_e, \omega) = |\omega_e A(\omega) \cos \beta|,$$

что возможно при условии равенства нулю показателя степени

$$kz = \frac{\omega^2}{g} z \approx 0.$$

Это обеспечивается при очень низких ($\omega \gg 1$) частотах волнения.

Амплитуда принимаемой к расчету непреднамеренной потери скорости значимой (центральной) волны оценивается по известному [6] для заданного района спектра волнения $S(\omega)$ и частоте ω [2]:

$$A(\omega) = \frac{1}{2} h_w = \sqrt{S(\omega)\Delta\omega}.$$

Тем самым, для того, чтобы технически решить проблему учета влияния только значимой волны, в структуру системы управления главным двигателем с ДАУ ВРШ и РН необходимо ввести фильтр 1 (рис. 5) низких частот волнения (потерь-колебаний скорости).

Низкочастотный фильтр колебания скорости должен иметь специфическую идеологию:

структуру фильтра следует понимать как фильтр колебаний, который в состоянии поглощать низкую частоту волнения моря (условно – "белый шум");

фильтр должен быть в состоянии и при волнении моря средней силы формировать функциональную зависимость, которая позволяет определить условия минимизации расхода топлива на милю пути;

фильтр должен позволять достаточно быстро выявлять ошибки в измерениях, несмотря на наличие помех на низких частотах.

Если спектр волнения для районов I–II–III Черного и Азовского морей [6] оценить по Пирсону-Московицу [2], то для судов типа "Измаил" [5] таким "белым шумом" является частота $\omega < 0,1$ Гц, которая должна быть отфильтрована фильтром 1.

Выводы.

1. Применение элементов стабилизации в связи ТНВД – РН в структуре ДАУ ВРШ приведет к относительной стабилизации рабочего процесса в главном двигателе в условиях волнения.

2. Фильтрация низких частот волнения позволит формализовать задачу поиска рационального режима работы главного двигателя судна в условиях регулярного и нерегулярного волнения при известном спектре волнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горб С.И., Верлатый Н.И., Лялькин А.С. Эксплуатация электронных регуляторов нагрузки главных двигателей // Морской трансп.: серия ТЭФ: экспресс-информ. – 1986. – Вып. 20 (640). – М.: В/О Мортехинформреклама. – С. 7 - 17.

2. Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Мореходность судов. – Л.: Судостроение, 1982. – 288 с.

3. Брошков С.Д. Модернизация регулятора нагрузки на судах типа "Измаил" // Автоматизация судовых технических средств: научн.-техн. сб. – 2001. – Вып. 6. – Одесса: ОНМА. – С. 3 - 8.

4. Суворов П.С., Лялькин А.С. Опыт эксплуатации системы управления главным двигателем и винтом регулируемого шага "Селма" на судах типа "Измаил" // Автоматизация судовых технических средств: научн.-техн. сб. – 1997. – Вып. 2. – Одесса: ОНМА. – С. 132 - 135.

5. Суворов П.С., Тарасенко Т.В. Прогнозирование влияния нерегулярного волнения на ходкость одновинтового судна // Автоматизация судовых технических средств: научн.-техн. сб. – 2005. – Вып. 10. – Одесса: ОНМА. – С. 76 - 92.

6. Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные. Регистр СССР. – Л.: Транспорт, 1974. – 359 с.