

**СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ПАРАМЕТРОВ БОРТОВОЙ КАЧКИ МАЛОМЕРНОГО СУДНА**

На основе многофункциональной анемометрической системы, формирующего фильтра морского волнения и системы датчиков (инклинометров) разработана система, позволяющая осуществлять измерение, контроль и оперативное прогнозирование экстремальных значений параметров бортовой качки маломерного судна в условиях экстремальных неконтролируемых внешних возмущений. Результаты модельных экспериментов подтверждают достаточно высокую точность функционирования предлагаемой системы.

Ключевые слова: система контроля и прогнозирования, прогнозирование параметров бортовой качки, анемометрическая система, система датчиков (инклинометров).

**СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТА ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ БОРТОВОЇ
ХИТАВИЦІ МАЛОМІРНОГО СУДНА**

На основі багатofункціональної анемометричної системи, формуючого фільтра морського хвилювання і системи датчиків (інклінометрів) розроблена система, що дозволяє здійснювати вимірювання, контроль і оперативне прогнозування екстремальних значень параметрів бортової хитавиці маломерного судна в екстремальних умовах неконтрольованих зовнішніх збурень. Результати модельних експериментів підтверджують високу точність функціонування запропонованої системи.

Ключові слова: система контролю та прогнозування, прогнозування параметрів бортової хитавиці, анемометрична система, система датчиків (інклінометрів).

**SYSTEM OF MONITORING AND OPERATIONAL PREDICTION PARAMETERS ROLL
FOR SMALL VESSEL**

On the basis of multifunctional anemometric system, forming filter of sea waves and the sensor (inclinometer) system developed a system that allows for measuring, monitoring and forecasting of extreme operational parameters of roll small boat under extreme uncontrollable external disturbances. The results of model experiments confirm sufficiently high accuracy operation of the proposed system.

Keywords: monitoring and prediction, prediction parameters roll, anemometer system, the sensors (inclinometers) system.

Постановка проблемы

В последнее время достаточно интенсивно развивается отрасль малого судостроения [1]. Малые суда в силу своих небольших геометрических размеров более других зависимы от погодных условий. Поэтому возникает необходимость в системах, которые бы с достаточной точностью определяли параметры действующих на корпус экстремальных неконтролируемых возмущений и прогнозировали фазовые состояния судна на определенный интервал времени, что позволило бы судну достичь более безопасной акватории. Поэтому разработка приборов необходимых для измерения параметров внешних возмущений, определения на их основе текущих значений бортовой качки судна в реальном времени и прогнозирования на заданный интервал упреждения параметров бортовой качки позволяет снизить возможность опрокидывания судна. Таким образом, задача автоматизированного определения и прогнозирования углов крена судна является актуальной, а ее решение направлено на снижение риска возникновения сложных и аварийных ситуаций за счет уменьшения влияния человеческого фактора.

Анализ последних исследований и публикаций

Существуют различные системы измерения, контроля и прогнозирования фазовых состояний судна, описанные в работах [2, 3, 4]. Их основная идея заключается в определении текущего угла крена и построении адекватной модели прогноза. При этом способы [2, 3] моделируют, но не измеряют параметры действующих внешних сил, оказывающих возмущающее воздействие на судно, что не позволяет с удовлетворительной точностью прогнозировать параметры бортовой качки на заданном интервале упреждения. К данным системам предъявляются достаточно высокие требования относительно показателей точности измерения и построения прогнозов, но в силу сложности математического описания нестационарных моделей объектов управления, возникает необходимость дальнейших исследований в данной области.

Формулирование цели исследования

Целью данного исследования является синтез системы измерения, контроля и оперативного прогнозирования значений углов крена маломерного судна получением параметров бортовой качки судна

системой датчиков инклинометров, характеристик ветрового возмущения многофункциональной анемометрической системой и модели морского волнения формирующим фильтром, а также разработка пользовательского графического интерфейса.

Изложение основного материала исследования

Рассмотрим схему системы (рис. 1).

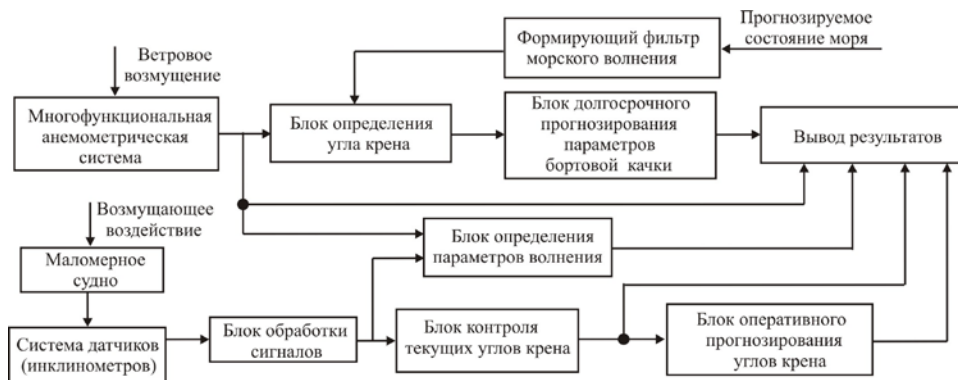


Рис. 1. Функциональная схема системы контроля и оперативного прогнозирования параметров бортовой качки

Синтез системы контроля и оперативного прогнозирования углов крена маломерного судна разбивается на следующие этапы:

- 1) построение функциональной схемы системы;
- 2) формирование системы измерения текущих характеристик бортовой качки судна на основе системы инклинометров;
- 3) построение математической модели определения параметров морского волнения с использованием системы датчиков инклинометров;
- 4) определение коэффициентов формирующего фильтра морского волнения;
- 5) формирование имитационной модели определения угла крена на основе статистических характеристик морского волнения и измеренных параметров ветрового возмущения;
- 6) выбор методов для построения долгосрочного и оперативного прогнозов значений бортовой качки;
- 7) разработка алгоритмической процедуры функционирования системы контроля и оперативного прогнозирования параметров бортовой качки маломерного судна;
- 8) создание графического пользовательского интерфейса, визуализирующего измеренные и определенные данные, а также сформированные прогнозы значений углов крена;
- 9) проведение имитационного моделирования для проверки корректности функционирования системы при воздействии на судно суммарного воздействия ветрового возмущения и морского волнения.

Предлагаемая система функционирует следующим образом. Измерение характеристик ветрового возмущения выполняется с помощью многофункциональной анемометрической системы [2], функциональная схема которой представлена на рис. 2.



Рис. 2. Функциональная схема многофункциональной анемометрической системы

Система датчиков инклинометров измеряет текущие углы крена судна. Далее численные значения углов крена и его производных, измеренных системой инклинометров, а также определенные с помощью анемометрической системы параметры ветрового возмущения подставляются в нелинейное уравнение бортовой качки [5], откуда параметры волнового возмущения определяются следующим образом:

$$\alpha_m \sin \sigma = \frac{I_x + \lambda_{44}}{Dh_0} \left(\frac{d^2 \Theta(t)}{dt^2} + \frac{2N_\Theta \operatorname{sgn} \Theta}{I_x + \lambda_{44}} \left(\frac{d\Theta(t)}{dt} \right)^2 \right) + \frac{Dh_0 \Theta}{I_x + \lambda_{44}} - \frac{1,3}{2(I_x + \lambda_{44})} \rho V^2(t) A_{\Pi} (z_{\Pi} - T) \quad (1)$$

где $\Theta(t)$ – текущий угол крена, N_Θ – коэффициент демпфирования, D – водоизмещение судна, $l_\Theta(\Theta)$ – плечо остойчивости, зависящее от угла крена, α_m – максимальный угол волнового склона, σ – частота волнения, h_0 – начальная метацентрическая высота, ρ – массовая плотность воздуха, $V(t)$ – скорость ветра, A_{Π} – площадь парусности, z_{Π} – ордината плеча парусности, T – осадка судна, I_x и ΔI_x – момент инерции массы судна и присоединенный момент инерции относительно центральной продольной оси

соответственно. После чего полученная информация направляется в блок вывода результатов и визуализируется посредством графического интерфейса.

Параметры бортовой качки, измеренные системой датчиков инклинометров, сопоставляются с критическими значениями по диаграммам остойчивости в блоке контроля текущих углов крена. В качестве примера для построения диаграмм остойчивости и определения по ним опасных углов крена, рассмотрим маломерное судно со следующими главными размерениями: с длиной корпуса $L=27$ м, шириной $B=6,21$ м, осадкой $T=1$ м, высотой борта $H=2$ м, общей площадью парусности $A_{\Pi}=37$ м².

Для выбранного маломерного судна определим плечи статической и динамической остойчивости при соответствующих им углах крена по формулам [2]:

$$l_{ст} = y_{\Theta} \cos \Theta + (z_{\Theta} - z_c) \sin \Theta - (z_g - z_c) \sin \Theta; \quad (2)$$

$$l_{д} = y_{\Theta} \sin \Theta - (z_{\Theta} - z_c) \cos \Theta - (z_g - z_c)(1 - \cos \Theta),$$

где $l_{ст}$, $l_{д}$ – плечи статической и динамической остойчивости соответственно, Θ – угол крена судна, y_{Θ} и z_{Θ} – координаты центра величины судна при крене судна на 90° , z_c – аппликата центра величины в прямом положении судна, z_g – аппликата центра тяжести в прямом положении судна.

Найденные по формулам (2) плечи остойчивости при сопоставлении с соответствующими им углами крена позволяют сформировать диаграммы статической и динамической остойчивости (ДСО и ДДО соответственно), которые представлены на рис. 3.

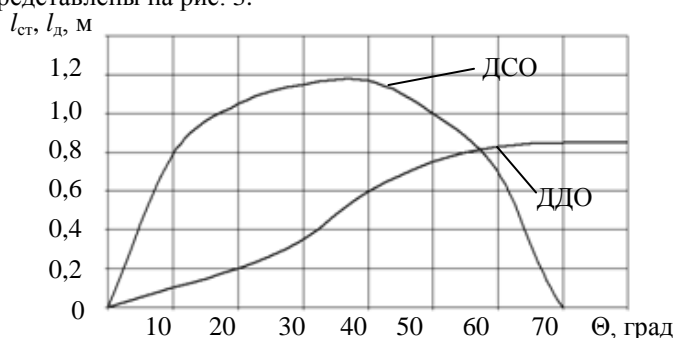


Рис. 3 Диаграммы остойчивости: 1 – ДСО, 2 – ДДО.

Анализ полученных диаграмм позволяет для удобства визуализации на средствах отображения информации пользователя условно разбить углы крена судна на следующие группы:

- безопасная зона – углы крена $< 10^{\circ}$;
- условно безопасная зона – углы крена от 10° до 20° ;
- опасная зона – углы крена от 20° до 40° ;
- критическая зона – углы крена $> 40^{\circ}$, при достижении которых возможно опрокидывание судна вследствие уменьшения плеча статической остойчивости.

После определения принадлежности текущего угла крена одной из четырех описанных выше групп, формируется оперативный прогноз на основе разложения нелинейной функции $\Theta(t)$ в ряд Тейлора [6]:

$$\Theta(t) = \Theta(t_0) + \left. \frac{d\Theta}{dt} \right|_{t_0} \Delta t + \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2\Theta}{dt^2} \right|_{t_0} \Delta t^2 + \dots + \frac{1}{n!} \left. \frac{d^n\Theta}{dt^n} \right|_{t_0} \Delta t^n + \dots + R_m, \quad (3)$$

где R_m – остаточный член ряда.

Измеряемый высший порядок производной текущего угла крена маломерного судна определяется техническими характеристиками системы инклинометров и для практических целей принимается $n = 4$.

Для формирования долгосрочного прогноза необходимо описать математическую модель бортовой качки судна с учетом измеренных параметров ветрового возмущения анемометрической системой и статистических характеристик морского волнения, полученных с помощью формирующего фильтра морского волнения, передаточная функция которого имеет вид [7]:

$$H(p) = \frac{2\sqrt{\alpha D_r}}{p^2 + 2\alpha p + (\alpha^2 + \beta^2)}, \quad (4)$$

где D_r – дисперсия волновой ординаты, α – коэффициент затухания, β – угловая частота волнения.

На основе проведенных измерений параметров ветрового возмущения и полученной модели морского волнения определяются углы крена. Для этого рассмотрим нелинейное уравнение бортовой качки в условиях ветрового и волнового возмущений [8]:

$$\frac{d^2\Theta(t)}{dt^2} + \frac{2N_{\Theta} \operatorname{sgn} \Theta}{I_x + \lambda_{44}} \left(\frac{d\Theta(t)}{dt} \right)^2 + \frac{Dh_0\Theta}{I_x + \lambda_{44}} = \frac{Dh_0}{I_x + \lambda_{44}} \alpha_m \sin \sigma + \frac{1,3}{2(I_x + \lambda_{44})} \rho V^2(t) A_{\Pi} (z_{\Pi} - T). \quad (5)$$

Численное моделирование дифференциального уравнения (5) позволяет получить значение угла крена для формирования долгосрочного прогноза на основе расчета математического ожидания $\bar{\Theta}_a$ и дисперсии амплитудных значений углов крена D_Θ [9]:

$$\bar{\Theta}_a = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \Theta_a(t) dt, D_\Theta = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (\Theta_a(t) - \bar{\Theta}_a)^2 dt, \quad (6)$$

где $\bar{\Theta}_a$ - математическое ожидание и D_Θ дисперсия амплитудных значений углов крена.

Ниже приведена разработанная алгоритмическая процедура функционирования системы контроля и оперативного прогнозирования параметров бортовой качки.

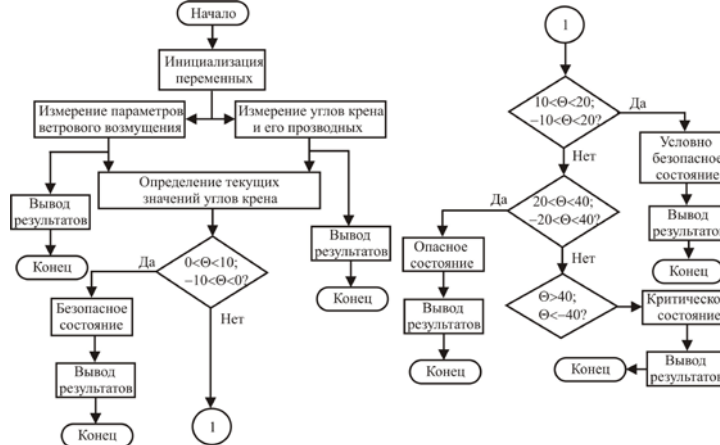


Рис. 4. Общая алгоритмическая процедура функционирования системы контроля и оперативного прогнозирования параметров бортовой качки

На основе разработанной многофункциональной анемометрической системы, построенных математической модели морского волнения на основе статистических характеристик при использовании формирующего фильтра, математической модели определения параметров волновых возмущений и текущих углов крена, а также сформированной алгоритмической процедуры идентификации принадлежности текущего угла крена к одной из групп, был разработан в среде визуального программирования пользовательский графический интерфейс системы контроля и оперативного прогнозирования параметров бортовой качки.

Для проведения модельного имитационного эксперимента функционирования системы были выбраны следующие условия:

- маломерное судно имеет следующие главные размерения: длина корпуса $L=27$ м, ширина $B=6,21$ м, осадка $T=1$ м, высота борта $H=2$ м, общая площадь парусности $A_n=37$ м²;
- постоянный курсовой угол судна к ветру – 30°;
- гидрометеорологические параметры, характерные для зимнего периода в Северной и Северо-Западной части Черного моря [10]: средняя скорость ветра $V_{cp} = 9$ м/с, состояние моря по шкале Бофорта – 4 балла.

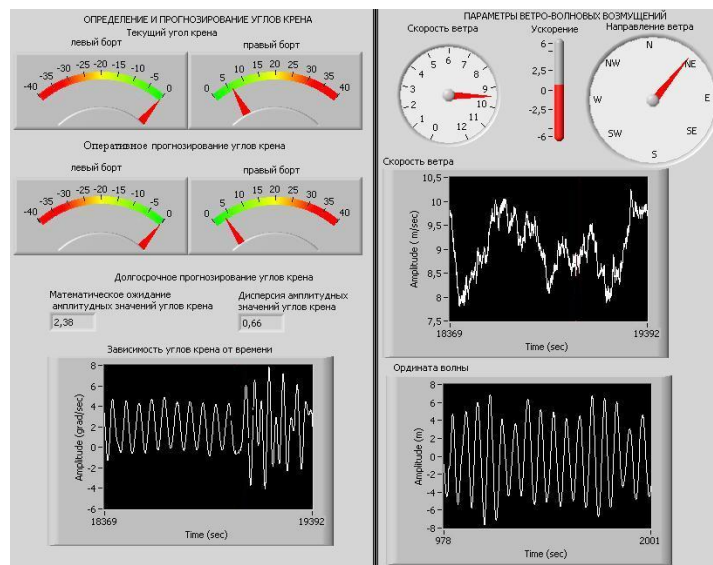


Рис. 5. Пользовательский графический интерфейс системы измерения и прогнозирования параметров бортовой качки

На рис. 5 приведен разработанный графический интерфейс для визуализации измеренных параметров ветро-волновых возмущений, определенных значений углов крена и сформированных прогнозов углов крена на заданный интервал времени. С учетом заданных выше условий были получены следующие данные. При высоте волны трехпроцентной обеспеченности 1,5-2 м и средней скорости ветра 9 м/с долгосрочный прогноз на 7 секунд составил $\bar{\Theta}_a = 2,38$ град, $D_{\Theta} = 0,66$ град². Сформированный оперативный прогноз выводится на табло с цветовой индикацией в режиме реального времени, что позволяет судоводителю оценить параметры бортовой качки не только качественно, но и количественно.

Выводы

Разработана система контроля и оперативного прогнозирования параметров бортовой качки на основе получения уточненных характеристик волнового возмущения с применением многофункциональной анемометрической системы, формирующего фильтра морского волнения и системы датчиков инклинометров.

Предлагаемая система, на основе измерения текущих углов крена и его высших производных позволяет сформировать оперативный прогноз относительно состояния углов крена на заданный интервал времени. Определение силы ветрового возмущения на основе измерений, выполняемых анемометрической системой и моделирование волнового профиля формирующим фильтром, позволяет определить углы крена для построения долгосрочного прогноза. Что, в конечном итоге, направлено на повышение безопасности мореплавания при эксплуатации маломерного судна в сложных метеорологических условиях.

Приведенные в статье примеры моделирования демонстрируют реальную физическую картину изменения углов крена судна в условиях ветро-волновых возмущений, и более высокую точность определения текущих углов крена маломерного судна, это позволяет снизить риск возникновения сложной ситуации вследствие влияния человеческого фактора, что особенно важно при эксплуатации маломерного судна в сложных погодных условиях.

Список использованной литературы

1. Леонова С. Н. Проектный подход к развитию малого судостроения в Украине [Текст] / С.Н. Леонова. – Харьков, 2011. – 1/7 (49). – С. 50-52.
2. Тимченко В. Л. Система автоматизированного контроля и прогнозирования остойчивости маломерного судна [Текст] / В.Л. Тимченко, Б.Н. Гордеев, А.Ю. Гайдай, Е.А. Куклина // Проблемы информационных технологий. – Херсон, 2014. – №1 (015). – С. 246 – 251.
3. Шлейер Г. Э. Управление движением морских и речных судов [Текст] / Г. Э. Шлейер, В. Г. Борисов. – Препринт. М., ИЛУ РАН, 1981 г., С. 38-53.
4. Пат. 2221726 РФ МПК В63В39/00. Способ прогнозирования фазового состояния судна [Текст] / Л. М. Клячко, Г. Э. Острецов, С. Г. Памухин; заявитель та патентообладатель Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН. – заявл. 05.06.2002 г.; публ. 20.01.2004 г.
5. Борисов, Р. В. Статика корабля [Текст] / Р. В. Борисов, В. В. Луговский, Б. В. Мирохин, В. В. Рождественский. – СПб. : «Судостроение», 2005. – 254 с.
6. Сигорский, В.П. Математический аппарат инженера [Текст] / В.П. Сигорский.– К.: Техніка, 1977. – 768 с.
7. Лукомский, Ю. А. Системы управления морскими подвижными объектами [Текст] / Ю. А. Лукомский, В.С. Чугунов. – Л. : «Судостроение», 1988. – 247 с.
8. Семенов-Тян-Шанский В.В. Качка корабля [Текст] / В.В. Семенов-Тян-Шанский. – Л.: Судостроение, 1969. – 392 с.
9. Корн, Г. Справочник по математике [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1984. – 832 с.
10. Ветер и волны в морях и океанах [Текст] : справочные данные / Регистр СССР. – М. : Транспорт, 1974. – 359 с.