

# СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТОЙЧИВОСТИ МАЛОМЕРНОГО СУДНА

УДК 681.51

## ТИМЧЕНКО Виктор Леонидович

д.т.н., профессор кафедры морского приборостроения, Национальный университет кораблестроения.

**Научные интересы:** оптимальные системы робастного управления динамическими объектами, динамическая стабилизация морских подвижных объектов.

## ГОРДЕЕВ Борис Николаевич

д.т.н., профессор кафедры морского приборостроения, Национальный университет кораблестроения.

**Научные интересы:** информационно-измерительные системы, полиметрические системы.

## ГАЙДАЙ Анна Юрьевна

к.т.н., старший преподаватель кафедры морского приборостроения, Национальный университет кораблестроения.

**Научные интересы:** устройство судна, многоякорные системы позиционирования, системы автоматизированного проектирования, системное программирование.

## КУКЛИНА Екатерина Алексеевна

аспирант кафедры морского приборостроения, Национальный университет кораблестроения.

**Научные интересы:** системы автоматического управления с компенсацией ветро-волновых возмущений, системы стабилизации курса судна.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Опыт эксплуатации маломерных судов (дедвейтом менее 80 тонн) свидетельствует о том, что основными факторами, которые ограничивают их использование в сложных метеорологических условиях, являются слеминг, брочинг, интенсивная бортовая качка и, как следствие последнего явления, возможность возникновения резонансной качки, при которой возможна потеря устойчивости и опрокидывание судна. Анализ статистических данных относительно аварийных ситуаций [1] показывает, что приблизительно 50% случаев происходит в результате интенсивной бортовой качки вследствие потери устойчивости. Поэтому решение задачи прогнозирования параметров бортовой качки позволит снизить уровень аварийности при эксплуатации маломерных судов.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Существуют различные способы прогнозирования фазовых состояний судна, описанные в работах [2, 3]. Их суть заключается в измерении текущего угла крена и формировании адекватной модели изменения параметров бортовой качки судна. Приведенные способы реализуют моделирование действующих на судно возмущающих воздействий, а не измерение их параметров (скорости и ускорения изменения углов крена), что не позволяет с необходимой точностью прогнозировать состояние фазовых координат судна на заданном интервале.

Таким образом, предлагаемая система автоматизированного контроля состояния мореходности направлена на повышение безопасности мореплавания путем измерения параметров возмущающих воздей-

вий для последующего их учета при прогнозировании параметров бортовой качки.

**Целью статьи** является разработка системы автоматизированного контроля устойчивости и прогнозирования параметров бортовой качки путем определения текущих значений углов крена при эксплуатации судна в сложных метеорологических условиях.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В процессе разработки системы автоматизированного контроля и прогнозирования устойчивости маломерного судна выделены следующие этапы: разработка функциональной схемы системы; формирование модели морского волнения; формирование математической модели бортовой качки судна с учетом действия возмущающих сил; долгосрочное прогнозирование значений бортовой качки; измерение текущих значений угла крена и его производных для краткосрочного прогнозирования; проведение имитационного моделирования для проверки корректности функционирования системы при воздействии на судно ветрового возмущения и морского волнения.

Синтез системы автоматизированного контроля и прогнозирования устойчивости маломерного судна, функциональная схема которой представлена на рис. 1, включает:

- 1) построение системы измерения значений параметров ветрового возмущения, действующего на судно;
- 2) определение коэффициентов формирующего фильтра морского волнения;
- 3) формирование имитационной модели определения текущего угла крена и сопоставление его с критическим значением на диаграммах устойчивости;
- 4) долгосрочное прогнозирование параметров бортовой качки на основе среднестатистических характеристик для заданного интервала упреждения;
- 5) определение системой датчиков текущего угла крена и его производных для краткосрочного прогнозирования устойчивости;
- 6) обработка полученных результатов и визуализация результатов.



Рисунок 1 – Функциональная схема системы автоматизированного контроля и прогнозирования устойчивости маломерного судна

В состав разрабатываемой системы входят:

- многофункциональная анемометрическая система [5], функциональная схема которой представ-

лена на рис. 2., позволяющая в реальном времени оценивать параметры ветрового возмущения с высокой точностью;

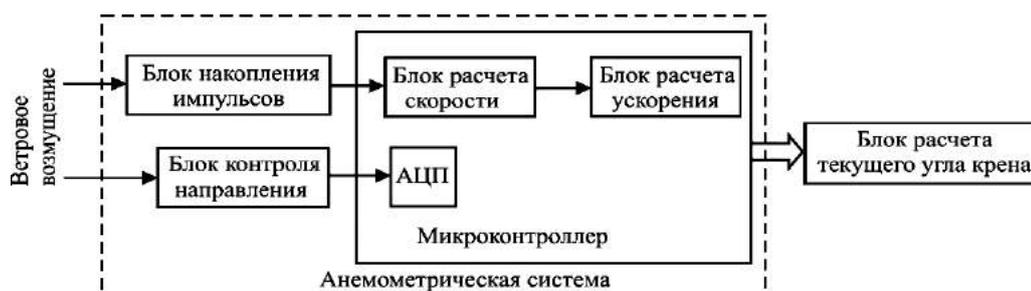


Рисунок 2 – Функциональная схема анемометрической системы

- формирующий фильтр, моделирующий средние значения параметров морского волнения, прогнозируемые гидрометеослужбой для данного района плавания.

- блок определения угла крена, в котором текущее значение определяется по схеме, приведенной в [6], путем сопоставления текущего угла крена с критическими значениями, которые найдены по диаграмме устойчивости для данного типа судна;

- блок определения прогнозируемых параметров бортовой качки;

- система датчиков, фиксирующих отклонения, вызванные действием на корпус судна возмущающих сил.

Передаточная функция фильтра имеет вид [7]:

$$H(p) = \frac{2\sqrt{\alpha D_r}}{p^2 + 2\alpha p + (\alpha^2 + \beta^2)}, \quad (1)$$

где  $D_r$  – дисперсия волновой ординаты,  $\alpha$  – коэффициент затухания,  $\beta$  – угловая частота волнения.

Ниже приведены зависимости промоделированных с помощью формирующего фильтра (рис. 3) и измеренных анемометрической системой (рис. 4) параметров возмущений, которые характерны для зимнего периода в Северной и Северо-Западной частях Черного моря [8].

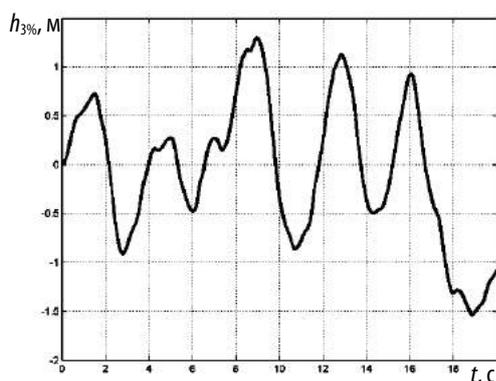


Рисунок 3 – Зависимость изменения ординаты волны

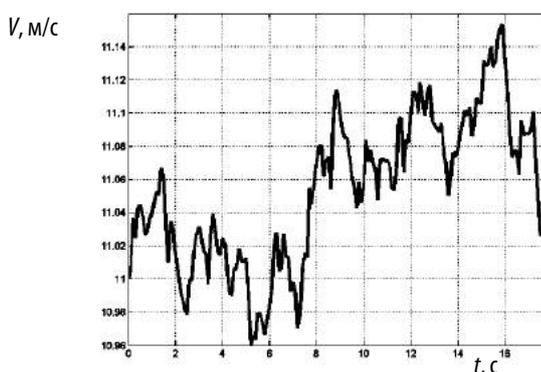


Рисунок 4 – Зависимость изменения скорости ветра

Функциональная схема системы определения и контроля углов крена представлена на рис. 5.

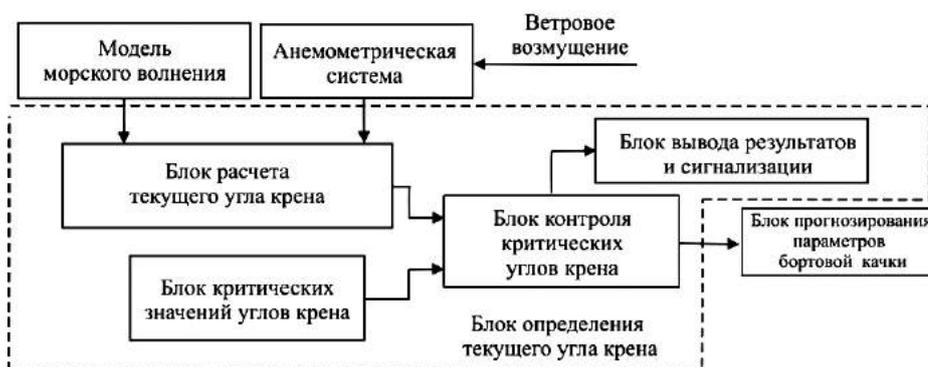


Рисунок 5 – Функциональная схема блока определения текущего угла крена

Текущие значения угла крена судна определяются с учетом ветрового возмущения и морского волнения уравнением вида [4, 5]:

$$\frac{d^2\Theta(t)}{dt^2} + \frac{2N_{\Theta}\Theta}{I_x + \Delta I_x} \left( \frac{d\Theta(t)}{dt} \right)^2 + D l_{\Theta}(\Theta) = \frac{I_x}{I_x + \Delta I_x} \sigma^2 \alpha(t) + \frac{1,3}{2(I_x + \Delta I_x)} \rho V^2(t) A_{\Pi}(z_{\Pi} - T), \quad (2)$$

где  $\Theta(t)$  – текущий угол крена,  $N_{\Theta}$  – коэффициент демпфирования,  $D$  – водоизмещение судна,  $l_{\Theta}(\Theta)$  – плечо устойчивости, зависящее от угла крена,  $\sigma$  – частота волнения,  $\alpha(t)$  – угол волнового склона,  $\rho$  –

массовая плотность воздуха,  $V(t)$  – скорость ветра,  $A_n$  – площадь парусности,  $z_n$  – ордината плеча парусности,  $T$  – осадка судна,  $I_x$  и  $\Delta I_x$  – момент инерции массы судна и присоединенный момент инерции относительно центральной продольной оси соответственно.

Численное моделирование дифференциального уравнения (2) позволяет получить значение угла крена в текущий момент времени для последующего сопоставления с критическими значениями для данного типа судна по диаграммам остойчивости [6].

Для обеспечения безопасности мореплавания необходимо выполнять долгосрочное и краткосрочное прогнозирование состояния углов крена судна. Долгосрочное прогнозирование осуществляется на основе определения математического ожидания и дисперсии углов крена на интервал прогнозирования, составляющий 20% от интервала наблюдения [10].

Краткосрочный прогноз достаточно высокой точности может быть сформирован основе измерений угла крена и его производных на интервале, который составляет от 0,5 до 0,6 периода собственных колебаний судна при бортовой и продольной качках [11].

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

где  $R_m$  – остаточный член ряда.

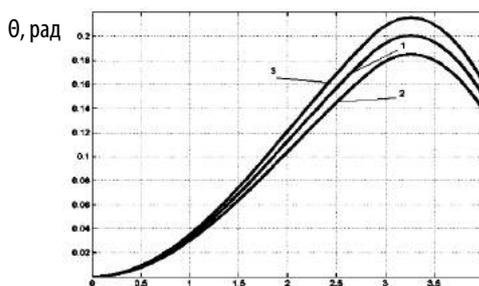


Рисунок 6 – Прогнозирование углов крена

- 1 – изменение угла крена имитационной модели качки судна;  
2 – прогноз по методу группового учета аргументов;  
3 – разложение в ряд Тейлора функции  $\Theta(t)$

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

Для проведения сравнительного анализа достоверности краткосрочных прогнозов рассмотрен метод группового учета аргументов [10], который заключается в прогнозировании значений корреляционной функции на один шаг вперед. Таким образом, например, на пятом шаге корреляционная функция при определении ее значений на предыдущих четырех шагах вычисляется следующим образом:

$R(5) = R(0)(1 + R(1)R(4) + R(2)R(3)) / (1 + R(4)^2 + R(3)^2)$   
Корреляционная функция описывается в дискретном времени и определяется из выражения [12]:

$$R(n) = \sum_{j=0}^5 \Theta_j \Theta_{j-n},$$

откуда прогнозируемое значение угла крена на один шаг вперед:

$$\Theta(6) = R(5) / \Theta(5).$$

Второй метод формирования краткосрочных прогнозов заключается в представлении нелинейной функции  $\Theta(t)$  в виде разложения в ряд Тейлора [13]:

Оба метода обеспечивают необходимую точность прогнозирования (рис. 6) (ошибка по методу группового учета аргументов составляет 7,4 %, при разложении в ряд Тейлора – 8,9 %). Однако метод группового учета аргументов формирует прогноз только на один шаг вперед, а метод разложения в ряд Тейлора – на заданный интервал упреждения, поэтому для решения последующих задач выбран последний метод.

Общий алгоритм функционирования системы автоматизированного контроля и прогнозирования остойчивости маломерного судна представлен на рис. 7.

Для удобства визуализации и контроля по диаграмме остойчивости, углы крена можно условно разделить на три группы [8]:

- безопасная зона – углы крена  $< 10^\circ$ ;
- опасная зона – углы крена от  $10^\circ \div 40^\circ$ ;
- критическая зона – углы крена  $> 40^\circ$ , при достижении которых вероятна потеря остойчивости.

При условии, если текущий угол крена  $> 10^\circ$ , судоводителю выдается тревожный сигнал об опасном состоянии судна.

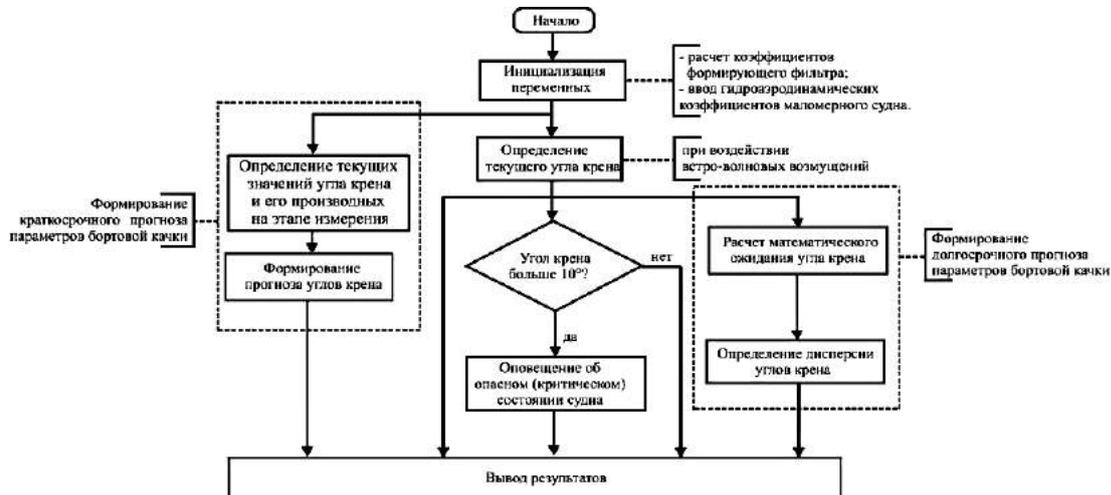


Рисунок 7 – Алгоритм функционирования системы автоматизированного контроля устойчивости маломерного судна

Формирование долгосрочного прогноза выполняется на основе расчета математического ожидания  $\bar{\Theta}_a$  и дисперсии  $D_{\Theta}$  амплитудных значений углов крена [12]:

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

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

Для модельного эксперимента были выбраны следующие гидрометеорологические параметры: постоянный курсовой угол к ветру  $-30^\circ$ , средняя скорость ветра  $V_{cp} = 11$  м/с, состояние моря  $-5$  баллов. Для проведения модельного эксперимента было принято, что частота волнения соотносится с  $h_{3\%}$  следующей эмпирической формулой [14]:

$$v = \frac{1}{(3,3 \sqrt{h_{3\%}})}.$$

где  $k = 3,3$  – приведенный коэффициент,  $h_{3\%}$  – амплитуда волны 3% обеспеченности.

Таким образом, принимается прогнозирование колебаний углов крена судна при постоянной частоте волнения.

Результаты имитационного моделирования демонстрирующего процесс определения, контроля и прогнозирования углов крена маломерного судна со следующими основными характеристиками: длиной корпуса  $L = 27$  м, шириной  $B = 6,21$  м, осадкой  $T = 1$  м, высотой борта  $H = 2$  м, общей площадью парусности

$A_n = 37$  м<sup>2</sup>, в условиях действия ветро-волновых возмущений, приведены на рис. 8-9.

На рис. 8 показан график сформированного прогноза угла крена, вызванного воздействием на судно морского волнения, изменение ординаты которого было представлено на рис. 3 в совокупности с ветровым возмущением (рис. 4). Прогнозирование выполняется с фиксированным шагом 0,5 с, при этом ошибка прогнозирования составляет на 0,5 секунде наблюдения  $-43,1\%$ , на первой секунде  $-35,5\%$ , на 1,5 секунде  $-20\%$ , на второй секунде  $-1,7\%$ .

На рис. 9 приведен график сформированного прогноза угла крена, вызванного воздействием на судно внезапной волны, высота которой превышает  $h_{3\%}$  в 2 раза. Ошибка прогнозирования при таких условиях составляет на 0,5 секунде наблюдения  $-46,1\%$ , на первой секунде  $-39,6\%$ , на 1,5 секунде  $-22,5\%$ , на второй секунде  $-10,2\%$ .

Сформированный долгосрочный прогноз показал, что математическое ожидание амплитуд угла крена составляет  $\bar{\Theta}_a = 0,259$  рад, дисперсия  $-D_{\Theta} = 0,064$  рад<sup>2</sup>.

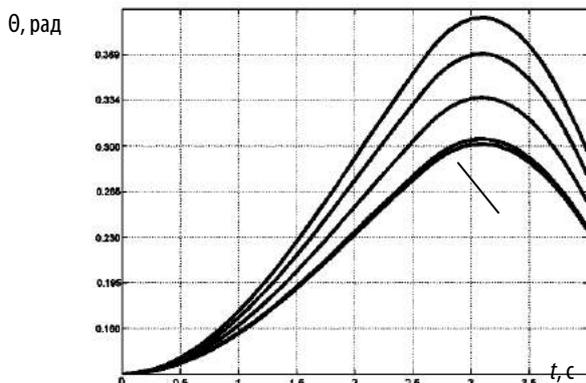


Рисунок 8 – Прогнозирование угла крена при  $h_{3\%}=3$  м  
1 – изменение угла крена имитационной модели качки судна

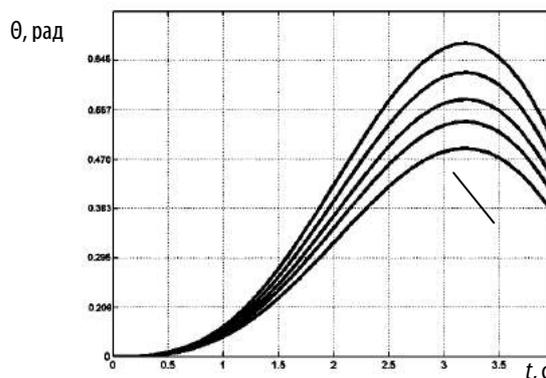


Рисунок 9 – Прогнозирование угла крена при двукратном превышении  $h_{3\%}$   
1 – изменение угла крена имитационной модели качки судна

## ВЫВОДЫ

Разработана система автоматизированного контроля и прогнозирования устойчивости с применением многофункциональной анемометрической системы и формирующих фильтров морского волнения, позволяющая, на основе определения текущих значений углов крена и его производных на этапе измерения, обеспечить точность прогнозирования критических углов крена судна для заданного интервала времени, и таким образом, повысить безопасность мореплавания

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Sichkarev, V. I. Ispol'zovanie v sudovozhdenii gidrometeorologicheskoi informacii [Ehl. resurs] / V. I. Sichkarev. – Novosibirsk: NGAVT, 2000. – 176 s.
2. Shlejger G. Eh. Upravlenie dvizheniem morskikh i rechnykh sudov [Tekst] / G. Eh. Shlejger, V. G. Borisov. – Preprint. M., ILU RAN, 1981 g., C. 38-53.
3. Pat. 2221726 RF MPK B63B39/00. Sposob prognozirovaniya fazovogo sostojanija sudna [Tekst] / L. M. Kljachko, G. Eh. Ostrecov, S. G. Pamukhin; zjavitel' ta patentoobladatel' Institut problem upravlenija im. V.A.Trapeznikova RAN. – zjavl. 05.06.2002 g.; publ. 20.01.2004 g.
4. Pat. 72946 Ukraina MPK2009 G01R 5/06. Anemometrchna sistema [Tekst] / V. L. Timchenko, I. V. Timchenko, K. O. Kuklina; zjavnik ta patentovlasnik Nac. unt korablebud. im. adm. Makarova. – №u201112524; zjavl. 25.10.2011; nadruk. 11.09.2012 r. Bjul. №17/2012. – 5 s. : il.
5. Lukomskij, Ju. A. Sistemy upravlenija morskimi podvizhnymi ob'ektami [Tekst] / Ju. A. Lukomskij, V. S. Chugunov. – L.: «Sudostroenie», 1988. – 247 s.
6. Timchenko, V. L. Avtomaticheskaja sistema opredelenija i kontrolja uglov krena malomemogo sudna [Tekst] / V. L. Timchenko, E. A. Kuklina // Nikolaev: Vestnik NUK, 2013. – Vyp. 2. – S 64-68.
7. Vagushhenko, L. L. Bortovye avtomatizirovannye sistemy kontrolja morekhodnosti [Tekst] / L. L. Vagushhenko, A. L. Vagushhenko, S. I. Zaichko. – Odessa: Feniks, 2005. – 272 s.
8. Semenov-Tjan-Shanskij, V. V. Kachka korablja [Tekst] / V. V. Semenov-Tjan-Shanskij. – L.: Sudostroenie, 1969. – 392 s.
9. Veter i volny v morjakh i okeanakh [Tekst] : spravochnye dannye / Registr SSSR. – M.: Transport, 1974. – 359 s.
10. Ivakhnenko, A. G. Samoorganizacija prognoziruushih modelej [Tekst] / A. G. Ivakhnenko, J. A. Mjuller. – K.: Tekhnika, 1985; Berlin: FEB Verlag Technik, 1984 – 223 s.
11. Pat. 2019856 RF MPK G01S11/00. Sposob prognozirovaniya kachki sudna [Tekst] / Ju. I. Nechaev; zjavitel' ta patentoobladatel' Ju. I. Nechaev. – zjavl. 06.02.1991 g.; publ. 15.09.1994 g.
12. Baskakov, S. I. Radiotekhnicheskie cepi i signaly [Tekst] / S. I. Baskakov. – M.: Vysshaja shkola, 2000 – 462 s.
13. Korn, G. Spravochnik po matematike [Tekst] / G. Korn, T. Korn. – M.: Nauka, 1984. – 832 s.
14. Antonenko, S. V. Prakticheskaja ocenka ostojichivosti v otkrytom more po kapitanskoi formule [Tekst] / S. V. Antonenko // Sb. nauchn. tr. 2-ojj Sakhalinskoi region. morsk. nauchn.-tekhn. konf. [«Morekhodstvo i morskije nauki – 2009»], (Juzhno-Sakhalinsk, 2010), – S. 21-29.