

*Куркова Ольга Петровна, доктор технических наук,
профессор Санкт-Петербургского государственного университета
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург
e-mail: aljaskaolga@mail.ru*

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ФАКТИЧЕСКОЙ ОСТОЙЧИВОСТИ СУДНА В УСЛОВИЯХ РЕЙСА

Аннотация: В статье показана целесообразность оснащения судов автоматизированными системами мониторинга фактического состояния остойчивости судна в режиме реального времени с целью повышения безопасности мореплавания. Представлены проблемные научно-технические аспекты создания бортовой системы мониторинга остойчивости. Предложен вариант технического решения задачи создания системы мониторинга и основополагающая методика вычисления текущего положения центра масс судна относительно трех осей координат с использованием данных real-time измерений фактических значений линейных ускорений, угловых перемещений и скоростей посредством инерциальных высокоточных приборов типа MRU (Motion reference unit).

Ключевые слова: остойчивость, состояние равновесия, смещение центра масс, угол крена, угол дифферента, угол рыскания, уравнение вращательно-колебательных движений, линейное ускорение, угловая скорость, информационно-измерительная система, безопасность мореплавания.

Abstract: The article shows the feasibility of equipping ships with automated systems for monitoring the actual state of stability of the vessel in real time in improve the safety of navigation. Problematic scientific and technical aspects of creating an on-Board stability monitoring system are presented. A variant of the technical solution to

the problem of creating a monitoring system and a basic method for calculating the current position of the ship's center of mass relative to the three coordinate axes using real-time measurements of the actual values of linear accelerations, angular displacements and speeds by means of inertial high-precision instruments such as MRU (Motion reference unit).

Keywords: stability, state of equilibrium, displacement of the center of mass, angle of roll, angle of trim, yaw angle, equation of rotational and oscillatory movements, linear acceleration, angular velocity, information and measurement system, safety of navigation.

Введение

Одним из важнейших качеств судна, оказывающим влияние на безопасность мореплавания, является остойчивость. Аварии судов от потери остойчивости по тяжести последствий представляют особую опасность. Как показывает практика, примерно 50 % аварий судов от потери остойчивости носят внезапный характер, а сам процесс опрокидывания судна происходит практически мгновенно; 31 % составляют аварии в результате медленного накренения судна, 19 % – от затопления с креном. Полностью спасти экипаж при гибели судов от опрокидывания удается только в 29 % случаев, в 23 % случаев экипаж погибает полностью [1]. Последствиями аварий судов в результате потери остойчивости являются не только гибель судна и экипажа, но и разливы нефтепродуктов, другие виды загрязнений прилегающих акваторий.

В связи с этим, «Международным кодексом остойчивости судов в неповрежденном состоянии 2008 года» (с изменениями на 2015 г.) [2], принятым в обеспечение безопасности мореплавания, предусматривается установка на борту судна «активных» инструментов контроля остойчивости. «Активные» инструменты контроля остойчивости должны представлять собой измерительно-вычислительный аппаратно-программный комплекс, включающий датчики автоматических измерений соответствующих физических величин, информация от которых в режиме real-time должна передаваться в качестве исходных данных

в «вычислитель» параметров остойчивости. Важным является то, что «активный» инструмент должен обеспечивать возможность оперативного контроля фактической остойчивости судна в режиме real-time не только при проведении погрузочно-разгрузочных работ в порту, но и во время рейса в различных условиях плавания с обязательной их идентификацией относительно уровня опасности ситуации и on-line представлением (визуализацией) результатов контроля Судоводителю. Однако «Международным кодексом остойчивости ...» предполагается, что наличие данных, получаемых посредством инструмента контроля остойчивости, не снимает с Судоводителя ответственности за опрокидывание судна. Судоводитель, как указывает Кодекс, «должен проявлять благоразумие и отличное умение управлять судном с учетом времени года, прогнозов погоды и района плавания, а также предпринимать соответствующие действия в отношении скорости и курса, требуемых данными обстоятельствами». Таким образом, бортовой «активный» инструмент контроля остойчивости должен являться автоматизированной компьютерной системой информационной поддержки принятия решений Судоводителя («*Decision Support System*» или сокращенно *DSS*) и направлен на снижение влияния человеческого фактора на безопасность мореплавания в различных сложных условиях рейса.

Анализ проблемы создания системы мониторинга фактической остойчивости

Сложность создания «активного» инструмента мониторинга остойчивости заключается, прежде всего, в том, что осуществить прямое измерение фактических значений параметров исходно характеризующих остойчивость, общепринятых в теории судостроения и кораблестроения, таких как: поперечная/продольная метацентрическая высота, координаты положения центра тяжести, центра величины и т.д., в период рейса в масштабе реального времени не представляется возможным. Кроме того в условиях реального рейса существует большая вероятность влияния на остойчивость судна таких факторов как: самопроизвольное смещение грузов, сброс груза, выработка топлива,

поступление воды внутрь корпуса судна, воздействие аномальных волновых и ветровых нагрузок и т.д., которые невозможно заблаговременно с высокой точностью учесть при предварительном весьма трудоемком расчете параметров остойчивости посредством бортовых «грузовых компьютеров», именуемых в нормативных документах Российского морского регистра судоходства как «приборы контроля загрузки» [3], в том числе предназначенных и для выполнения расчетов остойчивости судов в случаях их повреждения. Эти средства можно классифицировать как «пассивные» средства контроля остойчивости.

Несколько лет назад появились приборы, в том числе и компьютеризированные, оценивающие реальную остойчивость по динамике бортовой и килевой качки судна на базе использования в качестве средств измерений устанавливаемых на борту судна инклинометров для измерения углов крена и дифферента и так называемой «капитанской формулы» для вычисления текущего значения метацентрической высоты, исходя из фактических измеряемых значений периодов колебаний судна на волнении. Примером такого технического решения является система «Online Stability», предлагаемая компанией «Totem Plus Electronic, Inc» [4]. Однако инструменты, основанные на данном принципе, как показал опыт их применения, не обеспечивают требуемой точности и достоверности результата контроля даже при высокой точности используемых в составе систем инклинометров. Погрешность real-time вычислений значений метацентрической высоты, прежде всего, возникает из-за сложности обеспечения фильтрации сигналов, поступающих от инклинометров, по амплитудно-частотным диапазонам собственных и вынужденных колебаний судна (высокочастотных, низкочастотных колебаний), исходные значения которых на основе предварительных расчетов не определяются [5].

«Активный» инструмент оперативного контроля текущей остойчивости как DSS Судоводителя, устанавливаемый на борту, должен одновременно выполнять не только функции измерений, расчета и оценки параметров текущей остойчивости судна в режиме real-time, но и функцию аварийно-

предупредительной сигнализации, мгновенно предупреждающей Судоводителя об опасности, должен обладать достаточной точностью, информативностью и быстродействием. Быстродействие любой автоматизированных систем real-time кроме подбора электронных аппаратных средств, используемых в составе конфигурации системы, с соответствующими характеристиками и возможностями, в значительной степени обеспечивается путем минимизации объема вычислительных операций, закладываемых в архитектуру вычислительного алгоритма.

Однако, до недавнего времени, задача по созданию вычислительного алгоритма, одновременно соответствующего общепринятым основам теории остойчивости судов и функциональным требованиям автоматизированных систем мониторинга в режиме real-time, не ставилась и стала актуальной только с принятием новых международных требований по безопасности мореплавания.

Методика оперативного контроля фактической остойчивости

С точки зрения классической динамики, остойчивость судна, если его рассматривать как некое упруго-твердое тело, (не зависимо от условий загрузки и эксплуатации) характеризует состояние равновесия судна: положительная остойчивость – состояние устойчивого равновесия; отрицательная остойчивость – неустойчивого равновесия; нулевая остойчивость – безразличного равновесия. Состояния равновесия, в свою очередь, определяются положением центра масс (центра инерции) рассматриваемого тела (точки, в которой сумма моментов всех сил, а не только моментов сил тяжести, в отличие от центра тяжести, приложенных к телу, равна нулю) относительно некой виртуальной оси его вращательно-поступательных движений при одновременном воздействии возмущающих (опрокидывающих) и уравнивающих сил. Динамическим показателем устойчивости любого твердого тела служит угол устойчивости – угол поворота, на который необходимо повернуть тело для начала его опрокидывания, показывающий в каких пределах еще возможно восстановление его равновесия, или размах возможного перемещения центра масс до возможного опрокидывания тела в ту или другую сторону. Таким образом,

основная задача при создании системы оперативного контроля текущей устойчивости судна во время рейса сводится к определению фактических положений и направлений смещения центра масс при любых параметрах навигационной ориентации судна, вариантах загрузки и перемещения грузов, под воздействием внешних и внутренних возмущений. Сопоставления величин и направлений смещений центра масс с допустимыми расчетными (проектными) значениями позволит решить задачу оценки уровня опасности состояния судна, а Судоводителю, располагающему такой информацией, своевременно принять меры по обеспечению безопасности мореплавания за счет управления движением судна или, в отдельных случаях, за счет управления балластом или за счет оперативного перемещения груза, если это практически возможно.

Для нахождения фактических значений величины и направления смещений центра масс движение судна в общем случае необходимо рассматривать относительно трех взаимосвязанных систем координат:

- геоцентрической системы координат;
- основной строительной системы координат;
- системы координат, связанной с текущим положением центра масс.

Движение судна можно в этом случае рассматривать как вращательно-поступательное движение твердого тела – как сумму поступательного движения центра масс и углового движения судна вокруг центра масс.

Определить фактические текущие значения величины и направления смещений центра масс судна в условиях бортовой и/или килевой качки можно путем использования метода, основанного на измерениях фактических параметров:

- движения судна относительно геоцентрической системы координат, в которой движение и ориентация судна рассматривается посредством судовой навигационной системы;
- текущих углов крена и/или дифферента (дополнительно при необходимости углов рыскания);
- кажущегося линейного ускорения;

- угловой скорости относительно центра масс;
- абсолютного ускорения в произвольной точке судна;
- ускорения силы тяжести, определяемого в реальном масштабе времени;
- центростремительного ускорения (или как вариант тангенциального ускорения в зависимости от ориентации осей чувствительности средств измерений) относительно центра масс в двух фиксированных относительно основной декартовой строительной системы координат точках контроля, расположенных по оси вдоль продольной (диаметральной плоскости) в носовой и хвостовой части судна на известном расстоянии друг от друга, и/или двух фиксированных точках контроля, расположенных по оси вдоль поперечной плоскости по левому и правому борту корпуса судна.

Предположим, что средства измерения линейных ускорений установлены в точках контроля «1» и «2» на расстоянии « L » друг от друга на продольной оси судна – на оси « X », совпадающей с направлением диаметральной плоскости судна, как показано на рис. 1.

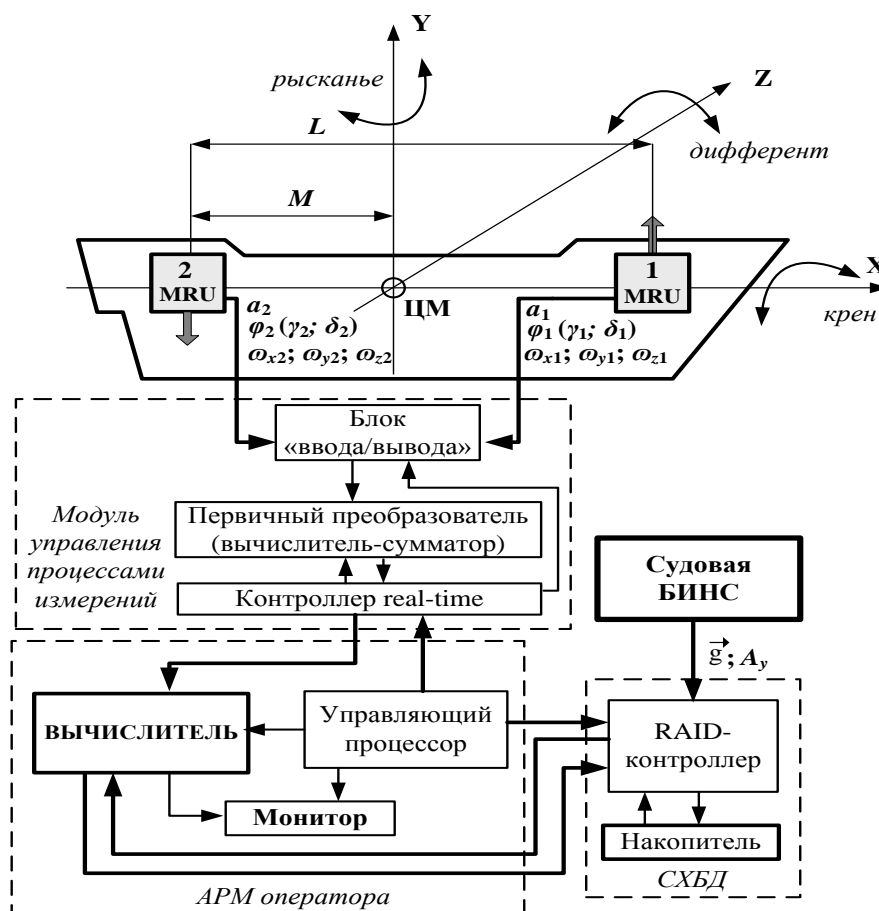


Рис. 1 Расчетная и структурно-функциональная схемы системы мониторинга текущей остойчивости судна

Средства измерений должны иметь ориентацию осей чувствительности, противоположно направленную относительно друг друга и параллельную вертикальной оси судна (оси «Y»). Тогда чувствительные элементы средств измерений будут в точках контроля «1» и «2» измерять значения тангенциальных ускорений « a_1 » и « a_2 » соответственно.

В этом варианте из уравнения вращательно-поступательного движения измеряемые проекции кажущегося ускорения на оси чувствительных элементов средства измерений в общем виде можно представить в векторной форме как:

$$\vec{d}_i = [\vec{A} + \vec{\Omega} \cdot (\vec{\Omega} \cdot M_i) + \dot{\vec{\Omega}} \cdot M_i - \vec{g}] \cdot \vec{Q}_i, \text{ при } i = \overline{1, N}$$

(1)

где:

N – номер точки контроля;

→

A – вектор кажущихся линейных ускорений;

→

Ω – вектор абсолютных угловых скоростей;

→

Q_i – вектор проекций осей чувствительности средств измерений, установленных в i -ой точке контроля, на оси системы координат (x, y, z) ;

→

M_i – вектор расстояния от центра масс до i -ой точки контроля;

→

g – вектор ускорения силы тяжести.

В выражении (1) составляющие центростремительного ускорения представлены как:

$$\vec{\Omega} \cdot (\vec{\Omega} \cdot M_i)$$

Составляющие тангенциального ускорения соответственно представлены как:

$$\dot{\vec{Q}} \cdot M_i$$

Вектор линейных ускорений можно представить в виде проекций на оси координат как:

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix},$$

вектор ускорения силы тяжести как:

$$\vec{g} = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix},$$

вектор абсолютных угловых скоростей в виде транспонированной матрицы как:

$$\vec{\Omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$$

Аналогично, вектор проекций осей чувствительности средств измерений в момент времени « t_j » можно представить как:

$$\vec{Q}_i = (Q_x^i, Q_y^i, Q_z^i)^T,$$

а вектор проекции расстояния от центра масс до i -ой точки контроля в момент времени « t » как:

$$\vec{M}_i = (M_x^i, M_y^i, M_z^i)^T$$

Тогда проекции векторов кажущихся линейных ускорений в точках контроля «1» и «2» в текущий момент времени « t_j » на параллельно направленную чувствительным элементам ось (ось «Y») будут равны:

$$\begin{aligned} a_1 &= A_y + \dot{\omega}_z M + \omega_x \omega_y M - g_y \\ a_2 &= -A_y + \dot{\omega}_z (L - M) + \omega_x \omega_y (L - M) + g_y \end{aligned} \quad (2)$$

где: $g_y = g \cos \varphi$, где, в свою очередь, « φ » – текущее значение угла деферента судна в момент времени « t_j ».

Для обеспечения точности измерений необходимо учитывать, что значение ускорения силы тяжести « g » в зависимости от географического положения судна в геоцентрической системе координат не будет являться величиной постоянной. Когда судно будет находиться на экваторе значение ускорения силы тяжести будет соответствовать величине $g=9,78 \text{ м/с}^2$, ближе к полюсам (например, в арктических или антарктических акваториях) его значение будет приближаться к величине $g=9,832 \text{ м/с}^2$.

Если считать, что курс и путевая скорость судна в текущий момент времени « t_j » не изменяется, то расстояние от i -ой точки контроля до центра масс в текущий момент времени « t_j » будет равно:

$$M = \frac{a_2 \cdot L}{(a_2 + a_1)} + \frac{L \cdot (g \cdot \cos \varphi - A_y)}{(a_2 + a_1)} \quad (3)$$

Аналогично можно представить расстояние до центра масс, рассматривая движение судна относительно других осей координат и/или изменения углов крена и/или рыскания, в том числе, если изменить ориентацию осей чувствительных элементов при установке средств измерений.

Например, если представить, что оси чувствительного элемента средства измерений направлены вдоль оси « X », то выражение для проекций векторов ускорений, аналогично выражению (2), будет иметь вид:

$$\begin{aligned} a_1' &= -A_x + \omega_z^2(L-M) - \omega_y^2(L-M) + g_x \\ a_2' &= A_x - \omega_z^2 M - \omega_y^2 M - g_x \end{aligned} \quad (4)$$

где проекцию ускорения силы тяжести на ось « X » можно представить как:
 $g_x = g \sin \varphi$.

Тогда при установившемся режиме движения судна относительно геоцентрической системы координат, аналогично выражению (3), можно записать:

$$M = 0,5 \cdot L + \frac{(a_1' - a_2') - 2(g \cdot \sin \varphi)}{2(\omega_z^2 + \omega_y^2)} \quad (5)$$

где ускорения « a_1' » и « a_2' » – проекции векторов линейных ускорений на ось «X» в соответствующих точках контроля.

Таким образом, из выражений (3) и (5) видно, что в любом случае фиксируемые средствами измерений значения приращений линейных ускорений и/или угловых скоростей в двух точках контроля в каждый момент времени « t_j » относительно ускорений в центре масс и/или момента времени « t_0 » будут характеризовать динамику (величину и направления) фактических текущих смещений центра масс судна.

Для измерений фактических значений « g » можно использовать судовой гравиметр, входящий в навигационный комплекс судна (модуль бесплатформенной инерциальной навигационной системы /БИНС/). Зная фактическое значение « g » в соответствии с текущим географическим положением судна и значения текущих углов дифферента и/или крена судна, можно вычислить значения проекций вектора ускорения силы тяжести.

Устройство для оперативного контроля фактической остойчивости

Описанная выше методика может быть реализована посредством бортовой автоматизированной информационно-измерительной системы мониторинга текущей остойчивости судна в режиме реального времени, укрупненная структурно-функциональная схема которой также представлена на рис. 1.

В качестве средств измерений, устанавливаемых в точках контроля, используются высокоточные интеллектуальные инерциальные приборы измерения параметров линейных и угловых перемещений типа MRU (Motion reference unit) с 6-тью степенями свободы (при необходимости с 9-ю степенями свободы). Современные приборы типа MRU на базе современных МЭМС акселерометров и гироскопов позволяют измерять угловые перемещения по дифференту, крену, рысканью (на рис. 1 углов φ ; γ ; δ соответственно) в диапазонах до $\pm 90^\circ$ с точностью не ниже $\pm 0,02^\circ$; угловые скорости – в диапазонах до ± 150 град/с с точностью не ниже $\pm 0,02$ град/с; линейные ускорения – в диапазонах до ± 30 м/с² с точностью не ниже $\pm 0,01$ м/с² с пропускной способностью от 0,01 Гц до 50 Гц. MRU могут устанавливаться как

на открытых палубах (обладая степенью защиты IP 68), так и в закрытых судовых помещениях. MRU и модуль управления процессами измерений позволяют обеспечить измерения с требуемой частотой дискретизации до 200 Гц, синхронизировать измерения с точностью не ниже $1 \cdot 10^{-3}$ с.

Первичный преобразователь, входящий в состав модуля управления процессами измерений, в соответствии с вычислительным алгоритмом встроенного программного обеспечения позволяет в непрерывном режиме real-time осуществлять параллельную первичную статистическую обработку данных по значениям линейных ускорений « a_1 », « a_2 », суммарное усреднение значений угловых перемещений (значений углов дифферента и крена) и угловых скоростей, измеряемых одновременно в носовой и кормовой части судна. Основной вычислитель в соответствии с вычислительно-аналитическим алгоритмом встроенного программного обеспечения с учетом исходно известного значения расстояния между точками контроля (L) позволяет аналогично в непрерывном режиме real-time осуществлять вычисление фактических текущих значений аппликаты, абсциссы и ординаты центра масс (M) судна и идентифицировать уровень опасности ситуации относительно установленных предельно допустимых расчетных значений смещения центра масс для каждого уровня: «ситуация в норме», «предопасная ситуация», «опасная ситуация», «аварийная ситуация».

Результаты вычислений и их идентификации on-line визуализируются на экране монитора, находящегося в рулевой рубке судна, в виде цветового часового индикатора. В случае достижения границы уровня «опасная ситуация» управляющий процессор формирует и передает команду на систему звуковой аварийно-предупредительной сигнализации (на схеме рис. 1 не показано) на включение звукового аварийного сигнала.

Система хранения баз данных (СХБД) обеспечивает архивацию и сохранение всех данных мониторинга в течение всего рейса судна, а также предусматривает возможность копирования данных на другие носители.

Суммарная точность измерительно-вычислительных каналов системы мониторинга текущего положения центра масс судна соответствует требованиям, установленными международными нормативными документами и нормативными документами Российского морского регистра судоходства для определения аппликаты ($\pm 1\%$ от базового расчетного значения или ± 5 см), абсциссы ($\pm 1\%$ от базового расчетного значения или ± 50 см) и ординаты ($\pm 0,5\%$ ширины судна от базового расчетного значения или ± 5 см) центра масс [2].

Система мониторинга остойчивости судна, структурно-функциональная схема которой представлена на рис. 1, в целях повышения безопасности мореплавания может использоваться как самостоятельный комплекс оборудования, так и в качестве составной части комплексной системы мониторинга прочности и остойчивости судна – системы типа «HMS» (Hull monitoring system).

Заключение

Предлагаемый вычислительно-аналитический алгоритм определения текущего положения центра масс судна с использованием фактических real-time данных измерений не требует выполнения большого объема вычислений, но является достаточно информативным для оперативной оценки состояния остойчивости судна непосредственно в процессе выполнения рейса в условиях стохастических изменений условий внешних и внутренних воздействий на судно.

Современный уровень развития IT-технологий и электронной компонентной базы позволяют создать бортовую систему контроля текущего состояния остойчивости, обладающую требуемыми для систем аварийно-предупредительной сигнализации быстродействием и точностью.

Оснащение судов автоматизированными системами мониторинга фактического состояния остойчивости судна в режиме реального времени как системами поддержки принятия решений Судоводителя значительно снизит влияние человеческого фактора на безопасность мореплавания.

Библиографический список:

1. Комаровский Ю.А. Исследование GPS-аппаратуры для оценки устойчивости судна по углу крена на установившейся циркуляции // Вестник инженерной школы ДВФУ. – № 2(23) (2015). – Владивосток: ДВФУ, 2015. – с. 39 – 49.
2. Международный кодекс устойчивости судов в неповрежденном состоянии 2008 года» (с изменениями на 2015 г.) [Электронный ресурс] – URL:<http://docs.cntd.ru/document/499028808> (дата обращения 14.01.2019).
3. Кутейников М.А., Одегов В.С. Приборы контроля устойчивости. Современные требования // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – № 42/43 (2016). – СПб: Российского морского регистра судоходства, 2016. – с. 64 – 69.
4. Официальный сайт компании «Totem Plus Electronic, Inc» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.TOTEMPLUS.COM> (дата обращения 28.11.2018).
5. Антоненко С.В. Практическая оценка устойчивости в открытом море по капитанской формуле // ИНТЕРНЕТ-ЖУРНАЛ САХГУ: НАУКА, ОБРАЗОВАНИЕ, ОБЩЕСТВО. 2009, №1 – стр. 12 – 15. [Электронный ресурс]. – URL: <http://sakhgu.ru/nauka/> (дата обращения 12.01.2019).