

УДК 629.5.058.47
EDN: DHCFUR

Д. Г. ГРЯЗИН, Т. В. ПАДЕРИНА

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННОГО КРЕНДИФФЕРЕНТОМЕТРА НА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКАХ, СВОБОДНОГО ОТ ДЕЙСТВИЯ ПЕРЕНОСНЫХ УСКОРЕНИЙ

В статье рассматриваются погрешности наиболее распространенных механических кренометров, устанавливаемых на мостике судна. Эти погрешности, обусловленные влиянием переносных ускорений, действующих на качке в месте установки прибора, достигают значительной величины. Чтобы устранить этот недостаток, разработан макет нового электронного кренодифференциатора. Описываются алгоритмы его работы, приводятся результаты имитационного моделирования, а также стендовых испытаний, которые подтверждают возможность выработки углов качки с точностью, соответствующей требованиям Российского морского регистра судоходства. Отмечается важность измерения статического крена для безопасности малых рыболовецких судов в условиях их эксплуатации. Оценена точность измерения этого параметра в макете нового прибора.

Ключевые слова: электронный кренометр, микромеханические датчики, переносные ускорения, комплементарный фильтр.

Введение

Механические кренометры давно получили распространение на гражданских судах. В основе их конструкции лежит короткопериодный маятник. Как правило, они устанавливаются на ходовом мостике на большом удалении от центра качания судна. В силу этого они имеют значительную динамическую погрешность, обусловленную влиянием переносных ускорений, действующих на качке в месте установки прибора.

Качка судна, в том числе бортовая, негативно влияет на его управляемость и может привести в определенных условиях к его опрокидыванию. Наиболее опасно воздействие углового ускорения бортовой качки, из-за которого в судовых конструкциях и креплениях грузов могут возникнуть опасные силы инерции, способные вызвать их разрушение [1]. Чрезвычайно важно не допускать стремительного роста бортовой качки судна, а для этого необходимо обеспечить постоянный мониторинг ее текущих параметров.

Кроме того, измерение статических углов наклона судна с требуемой точностью, в частности статического угла крена, также является крайне важной задачей, поскольку при работе промысловых судов в режимах лова в плохих погодных усло-

Грязин Дмитрий Геннадиевич. Доктор технических наук, главный метролог – начальник отдела, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Падерина Татьяна Владимировна. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

виях периодически происходят аварии из-за потери остойчивости, которая вызвана нарастанием статического крена на фоне качки.

Так, масштабная трагедия произошла 19.01.1965, когда неподалеку от берега Аляски в Бристольском заливе в один день перевернулись четыре траулера: «Бокситогорск», «Нахичевань», «Себеж» и «Севск» – суда типа «Логгер» 400 т водоизмещением, построенные ГДР [2]. Погибли более ста моряков. В настоящее время по оценке регистра Ллойда 46% судов гибнет из-за потери остойчивости. В нашей стране по этой причине 25.01.2018 затонул траулер «Восток» в Японском море, 28.12.2020 – рыболовное судно «Онега» близ берегов Новой Земли. Все эти аварии были связаны с тем, что судовые конструкции в условиях плавания в относительно теплой воде обросли льдом по причине внезапного понижения температуры воздуха, которое приводит к появлению водяного пара у поверхности. Отметим, что ледяная корка образуется и при отрицательных температурах во время шторма. Информация о статическом крене как показателе безопасности имеет большое значение при подъеме орудий лова с морепродуктами (тралов, неводов, крабовых ловушек) на борт судна, а также при транспортировке малыми сейнерами и траулерами улова рыбы, загруженного навалом на палубу, к плавбазе в течение нескольких часов. При работе в море с тяжеловесными грузами 50% аварий происходит вследствие внезапной потери остойчивости [3] и 31% – в результате медленного накренения [4].

Таким образом, создание прибора для измерения с требуемой точностью текущих углов бортовой качки и статического крена чрезвычайно актуально, а для этого необходимо устранить прежде всего его динамическую погрешность, проявляющуюся в условиях качки и обусловленную действием переносных ускорений. Отметим, что при выработке указанных параметров может быть также выполнена оценка угла дифферента. Это повышает информативность, что позволяет судоводителю более эффективно принимать решения.

В настоящей статье анализируются погрешности механических судовых кренометров, обусловленные влиянием переносных ускорений, действующих на качке в месте установки прибора. Предложена схема построения нового электронного кренодифференциметра (ЭКД), в котором эти недостатки устранены.

Статья имеет разделы, в которых:

- формулируется цель данной работы;
- освещается современное состояние рынка средств определения углов качки судна;
- анализируются основные погрешности маятниковых кренометров для судов различного водоизмещения;
- представлено комплексирование показаний микромеханических акселерометров и гироскопов с помощью комплементарного фильтра;
- приводятся результаты моделирования и стендовых испытаний макета ЭКД;
- оценивается погрешность выработки значений статического крена при проведении стендовых испытаний макета прибора;
- приводятся основные результаты данной работы.

Рынок судовых электронных кренометров

Механические маятниковые кренометры являются традиционным средством оценки угла крена на судне, при этом какие-либо технические требования к ним

в разделе 5 Правил по оборудованию морских судов Российского морского регистра судоходства [5] не предъявляются. В связи с этим рынок подобных приборов очень велик, а их стоимость незначительна.

Иная ситуация складывается с электронными кренометрами (ЭК). Их активная разработка в мире началась в связи с выходом в 2013 г. резолюции Комитета по безопасности мореплавания Международной морской организации (International Maritime Organization – IMO) MSC.363(92) [6]. В России аутентичные требования к наличию и характеристикам ЭК появились впервые в 2016 г. в упомянутых ранее правилах, где указано, что любое судно водоизмещением свыше 150 т, оборудованное регистратором данных рейса, должно быть оснащено ЭК. Он устанавливается на мостике и в соответствии с резолюцией IMO должен определять фактический угол крена в диапазоне до $\pm 90^\circ$, амплитуду и период бортовой качки в диапазоне от 4 до 40 с с нормируемыми погрешностями.

Эти требования были выработаны в связи с необходимостью повысить безопасность плавания судов путем контроля их остойчивости при качке, которая непосредственно связана с изменением статического угла крена. Кроме того, утверждается, что ЭК должен измерять текущий угол крена в диапазоне $\pm 90^\circ$ с погрешностью 5% от показаний или $\pm 1^\circ$ – в зависимости от того, что больше. При этом погрешность измерения фактического угла крена не должна быть подвержена чрезмерному воздействию иных линейных или вращательных движений судна (например, продольно-горизонтальная качка, поперечно-горизонтальная качка, вертикальная качка, килевая качка, рыскание) или ускорения в поперечном направлении в диапазоне от $-0,8 \text{ g}$ до $+0,8 \text{ g}$. На судах, построенных после 2019 г. и оборудованных регистратором данных рейса, наличие ЭК обязательно. Указанные требования отражены и в более поздней редакции документа [5] в разделе 5.27, однако они, как и раньше, касаются только общих сведений о составе прибора и его характеристиках.

Рынок ЭК ограничен небольшим числом производителей. Среди образцов зарубежных компаний наиболее разрекламированы приборы NT 100 EPR (Navitron Systems LTD) [7], ZEI-1 (Zoellner) [8], RDYB-510 (Rongde) [9]. Из отечественных производителей на рынке присутствуют всего две фирмы – ООО «НавМарин» (прибор NavComDelta 401) [10] и ООО «НТИ» (прибор «Дельта-К») [10]. Характеристики всех этих устройств в точности соответствуют требованиям [6], отличия заключаются лишь в сервисных возможностях индикации. Все ЭК состоят из блока датчиков и панельного дисплея с органами управления. Некоторые из них снабжены опцией измерения дифферента, однако ни один из приборов не измеряет статический крен. Очевидно, что в их конструкцию входят микромеханические датчики, при этом алгоритмы их работы, как и состав датчиков блока, представляют собой коммерческую тайну и не публикуются.

Кроме описанных выше на мировом рынке присутствуют и судовые приборы на основе инерциальных датчиков для измерения параметров движения, которые применяются для стабилизации спутниковых и телевизионных антенн, промерных эхолотов и решения других задач. Эти устройства также могут выступать в роли ЭК. Ими можно управлять с пульта управления судном в рулевой рубке, однако алгоритмы их работы не позволяют скомпенсировать переносные ускорения от качки, и поэтому блок чувствительных элементов должен быть установлен вблизи центра качания судна. К их числу следует отнести, например, Siatex MRU компании Kongsberg [12].

Отличием этого прибора является навигационная точность измерения углов качки и значительная стоимость.

Погрешности маятниковых кренометров

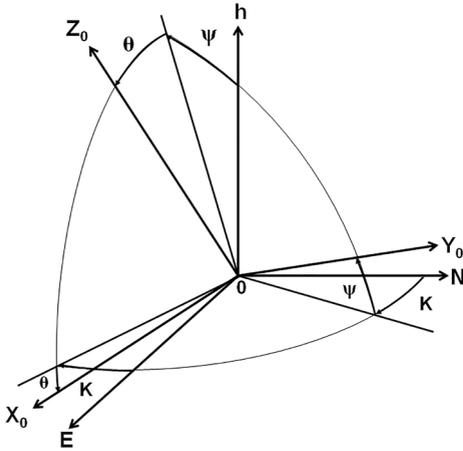


Рис. 1. Ориентация системы координат ENh относительно $oX_0Y_0Z_0$

Наиболее распространенный механический кренометр типа «КМ» с чувствительной массой 70 г и длиной маятника 110 мм обычно устанавливается на ходовом мостике на определенном удалении от центра качания (ЦК) судна. Маятник такого кренометра реагирует на ускорение n_{x0} вдоль оси oX_0 системы координат $oX_0Y_0Z_0$, связанной с судном (рис. 1). Будем считать, что центр o этой системы координат находится в ЦК судна, который можно рассматривать в качестве неподвижной точки. На рис. 1 показаны система координат $oX_0Y_0Z_0$, горизонтная система координат ENh с географической ориентацией осей и углы курса, килевой и бортовой качки судна – K, ψ, θ соответственно, определяющие ориентацию системы координат ENh относительно $oX_0Y_0Z_0$.

Проекция кажущегося ускорения места установки кренометра на ось oX_0 системы координат $oX_0Y_0Z_0$ будет иметь вид:

$$n_{x0} = n_{x0}^0 + \dot{\omega}_{y0}\rho_{z0} - \dot{\omega}_{z0}\rho_{y0} + \omega_{x0}(\omega_{y0}\rho_{y0} + \omega_{z0}\rho_{z0}) - \rho_{x0}(\omega_{y0}^2 + \omega_{z0}^2), \quad (1)$$

где n_{x0}^0 – проекция кажущегося ускорения на ось oX_0 в ЦК объекта; $\omega_{x0}, \omega_{y0}, \omega_{z0}$ – составляющие угловой скорости объекта по осям системы координат $oX_0Y_0Z_0$; $\rho_{x0}, \rho_{y0}, \rho_{z0}$ – составляющие вектора отстояния места установки кренометра от ЦК судна по осям системы координат $oX_0Y_0Z_0$.

Слагаемые $\dot{\omega}_{y0}\rho_{z0} - \dot{\omega}_{z0}\rho_{y0} + \omega_{x0}(\omega_{y0}\rho_{y0} + \omega_{z0}\rho_{z0}) - \rho_{x0}(\omega_{y0}^2 + \omega_{z0}^2)$ в (1) представляют собой составляющие вращательного и центростремительного ускорения (будем называть эти ускорения переносными), обусловленные влиянием качки при наличии отстояния места установки кренометра от ЦК судна.

Поскольку кренометр стараются разместить в диаметральной плоскости судна, обычно $\rho_{x0} = 0$. Тогда составляющие переносных ускорений в (1) приобретают вид:

$$n_{x\Pi} = \dot{\omega}_{y0}\rho_{z0} - \dot{\omega}_{z0}\rho_{y0} + \omega_{x0}(\omega_{y0}\rho_{y0} + \omega_{z0}\rho_{z0}). \quad (2)$$

Считая, что $\dot{K} = 0$, а также пренебрегая составляющими, связанными с угловой скоростью вращения Земли и перемещением объекта, в силу их малости, представим выражения для угловых скоростей и угловых ускорений следующим образом:

$$\omega_{x0} = \dot{\psi}, \quad \omega_{y0} = \dot{\theta}, \quad \omega_{z0} = \dot{\psi}\theta, \quad \dot{\omega}_{y0} = \ddot{\theta}, \quad \dot{\omega}_{z0} = \dot{\psi}\dot{\theta} + \ddot{\psi}\theta. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2) и учитывая величины только первых порядков малости, получим

$$n_{xII} = \ddot{\theta}\rho_{z0} - \ddot{\psi}\theta\rho_{y0}. \quad (4)$$

Дополнительный угол бортовой качки объекта $\theta_{дон}$, представляющий погрешность кренометра в выработке угла крена, обусловленную влиянием ускорения n_{xII} , можно рассчитать по формуле

$$\theta_{дон} = \arcsin\left(\frac{n_{xII}}{g}\right). \quad (5)$$

Представим угловое движение судна вокруг ЦК в виде гармонических колебаний:

$$\begin{aligned} \psi &= A_{\psi} \sin(\omega_{\psi} t + \psi_{\psi}), \\ \theta &= A_{\theta} \sin(\omega_{\theta} t + \psi_{\theta}), \end{aligned} \quad (6)$$

где A_{ψ} , A_{θ} – амплитуды гармонических колебаний углов продольных и боковых колебаний судна; ω_{ψ} , ω_{θ} , ψ_{ψ} , ψ_{θ} – частоты и фазы соответствующих колебаний. Рассчитаем значение $\theta_{дон}^{\max}$:

$$\theta_{дон}^{\max} = \arcsin\left(\frac{n_{xII}^{\max}}{g}\right), \quad (7)$$

где $n_{xII}^{\max} = A_{\theta}\omega_{\theta}^2\rho_{z0} + A_{\psi}A_{\theta}\omega_{\psi}^2\rho_{y0}$. Результаты расчета в соответствии с выражением (7) приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Расчет погрешности $\theta_{дон}^{\max}$ механического кренометра в зависимости от значений переносного ускорения n_{xII}^{\max}

Условия для расчета						Погрешность $\theta_{дон}^{\max}$, °	$\frac{\theta_{дон}^{\max}}{A_{\theta}}$, %
A_{θ} , °	A_{ψ} , °	ω_{ψ} , с ⁻¹	ω_{θ} , с ⁻¹	Отстояние от ЦК, м			
				ρ_{y0}	ρ_{z0}		
Для малых судов с интенсивной качкой							
6	6	1,57	1,57	0	2,5	3,8	66
6	6	1,57	1,57	0	10	14,8	246
6	6	1,0	1,0	20	10	7,2	120
10	6	1,0	1,0	20	10	12	120
15	6	1,0	1,0	20	10	18	120
Для крупнотоннажных судов с медленной качкой							
30	10	0,4	0,4	50	15	17,1	57
45	15	0,3	0,3	100	20	19	42

Как видно из табл. 1, наибольшая погрешность механического кренометра характерна для малых судов с интенсивной качкой, имеющей малые периоды, в частности

рыболовецких. Погрешность на таких судах может превышать истинное значение крена в 1,5-2,5 раза, в то время как на крупнотоннажных судах, имеющих более медленную качку, она значительно меньше.

Алгоритмы работы ЭКД на микромеханических датчиках

Измерение углов бортовой и килевой качки в широком диапазоне их изменения может быть выполнено с помощью инерциального измерительного модуля (ИИМ), построенного на базе триады микромеханических акселерометров (ММА) и триады микромеханических гироскопов (ММГ), оси чувствительности которых совпадают с осями системы координат $OX_0Y_0Z_0$.

Известно, что на базе таких ИИМ строятся бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) класса consumer grade [13, 14], алгоритм работы которых обеспечивает независимость выработанных углов бортовой и килевой качки от действия переносных ускорений. Вместе с тем такие БИНС требуют наличия постоянной информации о линейной скорости судна [15], что для грубого электронного кренометра представляется избыточным. Алгоритм действия ЭКД может быть построен с помощью оптимального комплексирования выходных сигналов ММА и ММГ, которые независимо друг от друга могут вырабатывать одну и ту же информацию – углы бортовой и килевой качки [16].

Широкое применение при решении близких задач получил алгоритм комплементарного фильтра, его определение дано, например, в [17]: «Суть комплементарного фильтра заключается в том, что при его использовании удается компенсировать неизбежно возникающие (наряду с подавлением помехи) при обработке данных от одного измерителя искажения самого оцениваемого параметра. Это достигается путем обработки данных от другого измерителя таким образом, чтобы не только «подавить» его ошибки, но и ликвидировать искажения полезного сигнала, внесенные при обработке данных от первого измерителя, т.е. должным образом дополнить искаженный сигнал».

Уравнение комплементарного фильтра имеет вид [21]:

$$\hat{\alpha} = W_{\text{ФВЧ}}(p) \cdot \alpha_e + W_{\text{ФНЧ}}(p) \cdot \alpha_A, \quad (8)$$

где $W_{\text{ФВЧ}}(p)$ – передаточная функция фильтра высоких частот (ФВЧ); $W_{\text{ФНЧ}}(p)$ – передаточная функция фильтра низких частот (ФНЧ); α_e, α_A – углы крена (дифферента), выработанные по информации ММГ и ММА соответственно; $\hat{\alpha}$ – оценка угла крена (дифферента), выработанная фильтром.

Применение комплементарного фильтра в ЭКД позволяет компенсировать воздействие на ММА переносных ускорений на качке с помощью ММГ, а погрешности, вызванные дрейфом ММГ, уменьшаются за счет показаний ММА. При этом для ММГ комплементарный фильтр является ФВЧ, а для ММА – ФНЧ [18]. Таким образом, низкочастотная составляющая выходного сигнала ЭКД формируется по показаниям ММА, а высокочастотная – по показаниям ММГ. Следовательно, в углах бортовой и килевой качки, вырабатываемых ЭКД, устраняются динамические погрешности, обусловленные действием переносных ускорений, присутствующих в показаниях ММА.

В простейшем случае в качестве ФВЧ и ФНЧ можно воспользоваться соответствующими звеньями с передаточными функциями:

$$W_{ФВЧ}(p) = \frac{Tp}{Tp+1}, \quad W_{ФНЧ}(p) = \frac{1}{Tp+1}, \quad (9)$$

где T – постоянная времени ФВЧ и ФНЧ.

Для того чтобы фильтры ФНЧ и ФВЧ не влияли на полезный сигнал, необходимо выполнить условие инвариантности [17]:

$$W_{ФНЧ}(p) + W_{ФВЧ}(p) = 1. \quad (10)$$

Погрешности углов α_z, α_A можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_z &= \Delta\omega_z / p, \\ \Delta\alpha_A &= \Delta n / g, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\Delta\omega_z, \Delta n$ – инструментальные погрешности ММГ и ММА.

Тогда с учетом (8, 9, 10) получим следующее выражение для оценки угла $\hat{\alpha}$:

$$\begin{aligned} \hat{\alpha} &= W_{ФНЧ}(p)(\alpha + \Delta\alpha_A) + W_{ФВЧ}(p)(\alpha + \Delta\alpha_z) = [(1 - W_{ФВЧ}(p))](\alpha + \Delta\alpha_A) + \\ &+ W_{ФВЧ}(p)(\alpha + \Delta\alpha_z) = \alpha + [(1 - W_{ФВЧ}(p))]\Delta\alpha_A + W_{ФВЧ}(p)\Delta\alpha_z. \end{aligned} \quad (12)$$

Подставляя в (12) выражение для передаточной функции $W_{ФВЧ}(p)$ из (9), получим:

$$\hat{\alpha} = \alpha + \frac{1}{Tp+1}\Delta\alpha_A + \frac{Tp}{Tp+1}\Delta\alpha_z. \quad (13)$$

Из (13) следует, что погрешность оценки угла ($\alpha - \hat{\alpha}$) будет зависеть от погрешностей ММА $\Delta\alpha_A$, ММГ $\Delta\alpha_z$ и постоянной времени T фильтра, причем увеличение T приводит к повышению влияния $\Delta\alpha_z$ на погрешность оценки. Выражение (13) позволяет аналитически или с помощью имитационного моделирования получить оценки $\hat{\alpha}$ при заданных погрешностях ММГ, ММА и постоянной времени T и в конечном итоге найти оптимальное значение T для данной задачи.

Учитывая (8), (9), а также то, что угол $\alpha_z = \frac{\omega_z(p)}{p}$, где ω_z – угловая скорость ММГ, и переходя от операторной формы представления аperiodического звена первого порядка к его дискретному виду [19, 21], запишем разностное уравнение для нахождения текущей оценки угла $\hat{\alpha}$ следующим образом:

$$\hat{\alpha}_t = K [\hat{\alpha}_{t-1} + \omega_z \Delta t] + (1 - K)\alpha_A, \quad (14)$$

где $\hat{\alpha}_t, \hat{\alpha}_{t-1}$ – оценки угла в текущий и предыдущий моменты времени соответственно;

α_A – значение угла, полученное по показаниям ММА;

Δt – интервал дискретизации;

K – коэффициент фильтра.

Коэффициент фильтра K и постоянная времени T связаны соотношением [19, 21], которое будет использовано ниже при выборе параметров фильтра:

$$K = \frac{1}{1 + \frac{\Delta t}{T}}. \quad (15)$$

В [18] даются следующие рекомендации по выбору значения коэффициента фильтра K при комплексировании информации ММГ и ММА: коэффициент K должен находиться в диапазоне значений $0,95 \dots 0,99$. Выбор такого диапазона объясняется тем, что при значениях $K < 0,95$ увеличивается влияние погрешности ММА, а при приближении K к единице начнет увеличиваться статическая погрешность оценки, обусловленная в первую очередь влиянием смещения нуля ММГ, а также время переходного процесса фильтра.

Следует обратить внимание на то, что в [18] нигде не сказано, какому интервалу дискретизации эти рекомендации соответствуют. Очевидно, при использовании высокой частоты дискретизации значение K становится больше. В связи с этим, на наш взгляд, правильнее при решении конкретных задач рекомендовать делать выбор в пользу постоянной времени T комплементарного фильтра, а не K , ведь именно от параметра T зависят его фильтрующие свойства.

Тем не менее, как описано в [18], при выборе K для комплементарного фильтра важно проверить наличие шумов измерений ММА в области низких частот и оценить уровень нестабильности смещения нуля ММГ.

С этой целью воспользуемся графиками девиации Аллана для применяемых в ЭКД микромеханических гироскопов ММГ CRM (рис. 2) и трехосного микромеханического акселерометра ADXL 355 (рис. 3). Оба графика построены при формировании массива выходных данных ММГ CRM100 и ММА ADXL 355 в составе ЭКД в течение 20 ч с интервалом дискретизации $\Delta t = 0,01$ с.

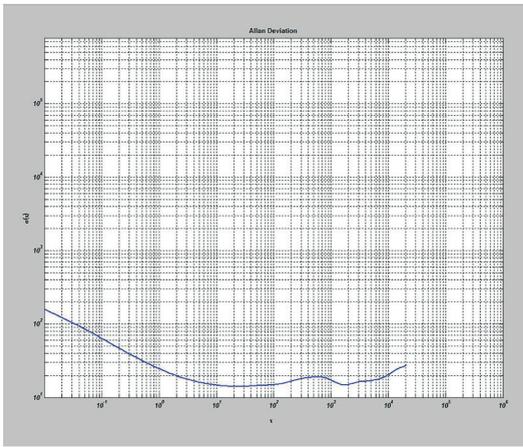


Рис. 2. График девиации Аллана для ММГ CRM100

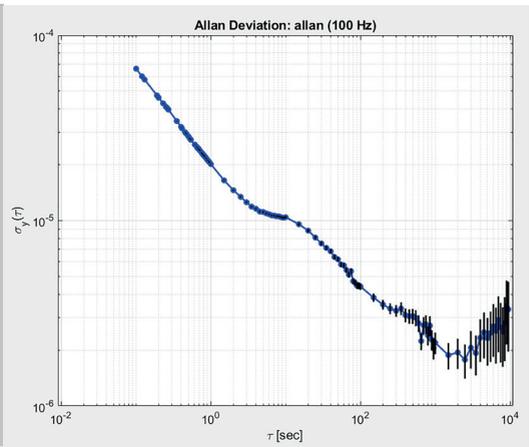


Рис. 3. График девиации Аллана для ММА ADXL 355

По графику на рис. 3 определим нестабильность смещения нуля ММА в запуске, соответствующую фликкер-шуму [25]:

$$B = \sqrt{\frac{\pi}{2 \ln 2}} \sigma(\tau_{cp}) \approx 1,5 \sigma(\tau_{cp}), \quad (16)$$

где τ_{cp} – типичное время осреднения на участке аппроксимированной кривой графика девиаций Аллана при коэффициенте ее наклона $a = 0$. В соответствии с рис. 3 нестабильность смещения нуля ADXL 355 в запуске мала и составляет $\approx 3 \cdot 10^{-6}$ g.

По графику девиации Аллана для ММГ CRM100 (рис. 2) аналогичным образом получим значение нестабильности смещения нуля ММГ – $22^\circ/\text{ч}$ [24].

Учитывая полученные значения неустойчивости смещений нулей ММГ и ММА, будем полагать, что коэффициент фильтра K для данной задачи должен быть близок к значению 0,99, что соответствует диапазону величин постоянной времени T фильтра от 5 до 20 с при интервале дискретизации $\Delta t = 0,01$ с.

Окончательный выбор постоянной времени T фильтра и, соответственно, коэффициента фильтра K может быть сделан на основе результатов имитационного моделирования схемы ЭКД и стендовых испытаний прибора.

На рис. 4 приведена блок-схема выработки углов крена и дифферента в вычислительном устройстве ЭКД.

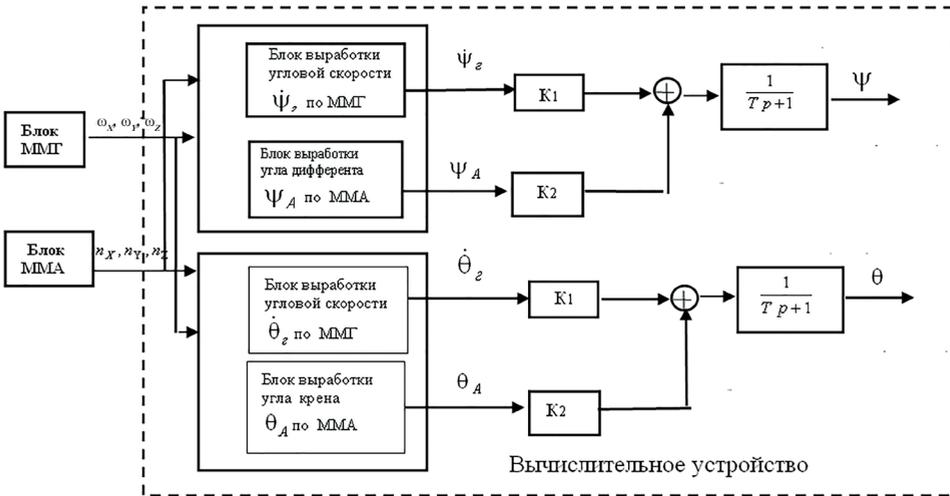


Рис. 4. Блок-схема выработки углов крена и дифферента в вычислительном устройстве ЭКД

Для обеспечения условия инвариантности (10) коэффициенты K_1 и K_2 необходимо выбирать из условия

$$\frac{K_1}{K_2} = T.$$

Если $K_2 = 1$, то значение коэффициента K_1 должно быть равно постоянной времени: $K_1 = T$.

Таким образом, выработку углов крена и дифферента в соответствии с рис. 4 следует производить по следующему алгоритму.

1. По сигналам ММГ вычисляются угловые скорости бортовой $\dot{\theta}$ и килевой $\dot{\psi}$ качки по выражениям

$$\dot{\theta} = \omega_{y_0} + tg\psi(\omega_{x_0} \sin \theta - \omega_{z_0} \cos \theta), \quad \dot{\psi} = \omega_{z_0} \sin \theta + \omega_{x_0} \cos \theta, \quad (17)$$

где $\omega_{x_0}, \omega_{y_0}, \omega_{z_0}$ – составляющие вектора угловой скорости вращения трехгранника $OX_0Y_0Z_0$, вырабатываемые блоком ММГ.

2. По сигналам ММА вычисляются углы крена и дифферента по выражениям

$$\begin{aligned} \theta_A &= \text{arctg}(-n_{x_0} / n_{z_0}), \\ \psi_A &= \text{arcsin}(n_{y_0}). \end{aligned} \quad (18)$$

3. Сигналы углов крена и дифферента, вычисленные в соответствии с (18), поступают на звенья с коэффициентом усиления K_2 , а угловые скорости бортовой $\dot{\theta}$ и килевой $\dot{\psi}$ качки, вычисленные в соответствии с (17), поступают на звенья с коэффициентом усиления K_1 .

4. Полученные таким образом сигналы в каналах ММА и ММГ суммируются. Сумма этих сигналов подается на входы аperiodических звеньев $\frac{1}{T_{p+1}}$, на выходе которых формируются вырабатываемые в ЭКД значения углов крена и дифферента.

Результаты имитационного моделирования схемы ЭКД и стендовых испытаний макета прибора

Чтобы оценить эффективность предложенной схемы ЭКД, было выполнено имитационное моделирование работы комплементарного фильтра в среде MATLAB (Simulink). По его результатам при задании постоянной времени T в диапазоне от 5 до 20 с было выбрано значение $T = 10$ с (соответствующее коэффициенту фильтра $K = 0,998$), которое обеспечивает наилучшую оценку углов крена и дифферента при различных значениях заданных периодов бортовой и килевой качки.

Задавались параметры фильтра (рис. 4) $K_1 = 10$, $K_2 = 1$, $\Delta t = 0,01$ с и использовались следующие модели погрешностей ММГ и ММА:

- марковские процессы первого порядка модели уходов ММГ со среднеквадратическим отклонением (СКО) $\sigma_1 = 15^\circ/\text{ч}$ и интервалом корреляции $\alpha_1^{-1} = 30$ с;
- систематические составляющие уходов ММГ, характеризующие смещение нулей от пуска к пуску, – случайные величины с СКО $\sigma_2 = 15^\circ/\text{ч}$;
- систематические составляющие, характеризующие смещение нулей ММА, – случайные величины с СКО $\sigma_3 = 0,0009$ г.

В табл. 2 представлены результаты моделирования.

Т а б л и ц а 2

Предельные значения погрешностей выработки углов крена и дифферента при моделировании

Заданные значения параметров качки судна				Отстояние ρ_{z_0} , м	Предельные погрешности по модулю углов, °	
Крен		Дифферент			крена	дифферента
Амплитуда, °	Период, с	Амплитуда, °	Период, с			
15	4	10	3	10	0,45	0,40
15	15	10	10	10	0,23	0,24
30	15	15	10	10	0,35	0,27
45	20	20	15	20	1,12	0,31
90	40	20	14	20	1,55	0,35

Стендовые испытания макета ЭКД проводились при задании попеременно гармонических колебаний по углам бортовой и килевой качки на двухосном поворотном столе. При этом макет прибора устанавливался на планшайбу поворотного стола и подключался к персональному компьютеру.

На рис. 5 в качестве примера приведен один из графиков, полученных в ходе испытаний, на котором показана разность значений углов крена, выработанных ЭКД и стендом, при задании бортовой качки с амплитудой $A = 15^\circ$ и периодом $T = 15$ с. Как видим (рис. 5), предельная погрешность по модулю выработки угла крена не превышает $0,27^\circ$.



Рис. 5. Разность значений углов крена, выработанных ЭКД и стендом

В табл. 3 приведены некоторые результаты стендовых испытаний.

Т а б л и ц а 3

Предельные значения погрешностей выработки углов крена и дифферента при проведении стендовых испытаний

Заданные значения параметров качки судна				Отстояние ρ_{z_0} , м	Предельные погрешности по модулю углов, °	
Крен		Дифферент			крена	дифферента
Амплитуда, °	Период, с	Амплитуда, °	Период, с			
15	15	10	10	0	0,27	0,24
15	15	10	10	1	0,27	0,24
45	20	20	15	0	1,1	0,31
45	20	20	15	1	1,2	0,32
45	40	30	40	0	0,95	0,50

Из табл. 2 и 3 видно, что, если воспроизвести одинаковые параметры гармонической качки (выделено серым цветом), полученные оценки погрешностей выработки углов крена и дифферента при проведении имитационного моделирования и стендовых испытаний макета ЭКД имеют близкие значения. При этом уровни погрешностей углов качки, достигнутые в ходе стендовых испытаний, гораздо ниже допустимых требованиями РМРС [5].

В процессе стендовых испытаний макет прибора также был размещен на расстоянии ~1 м по вертикальной оси от планшайбы стола с целью имитации отстояния прибора от ЦК, при этом задавалась гармоническая качка. Полученные в этом случае погрешности ЭКД остались почти такими же, как и при установке прибора непосредственно на планшайбу стола. Это подтверждает наличие эффекта подавления в ЭКД динамических погрешностей ММА, вызванных воздействием переносных ускорений на качку.

Определение статического крена в ЭКД

Статический крен судна обусловлен действием некоторой статической, то есть неизменной по своей величине силы, возникающей на фоне гармонической качки. Причиной статического крена, как было сказано ранее, может быть ветровая нагрузка, обледенение судовых конструкций, подъем на борт орудий лова на промысловых судах, а кроме того, поступление воды внутрь корпуса в результате пробойны или другая аварийная ситуация. Оценка текущего значения статического крена и его изменение позволит предупредить в будущем потерю остойчивости судна и принять необходимые меры к обеспечению безопасности экипажа.

Статический крен может быть определен за время, соответствующее не менее десяти [26] полным периодам колебаний по углам бортовой качки, по следующей формуле:

$$\theta_{ст} = \frac{\sum_{i=1}^{10} (-\theta_{i \text{ лев. борг}}^{\max} + \theta_{i \text{ прав. борг}}^{\max})}{2} / 10, \tag{18}$$

где $\theta_{i \text{ прав. борг}}^{\max}$, $\theta_{i \text{ лев. борг}}^{\max}$ – амплитуды колебаний углов бортовой качки судна на правый и левый борт соответственно.

Чтобы оценить погрешность выработки значений статического крена, макет ЭКД был установлен на двухосном стенде качки. В ходе экспериментальных исследований на стенде задавались значения статического крена +3°, +5°, -4° и соответствующие параметры гармонической качки, приведенные в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Значения статического крена и его погрешности, полученные в ходе стендовых испытаний

Заданные значения параметров качки судна			Предельные погрешности по модулю определения статического крена, °
Крен		Статический крен, °	
Амплитуда, °	Период, с		
15	15	+3	0,081
15	10	+5	0,087
20	20	-4	0,091

Из табл. 4 видно, что погрешность измерения статического крена ЭКД не превышает 0,1°.

Выводы

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

- применение механических кренометров на судах для оценки параметров бортовой качки приводит к значительным погрешностям. Наибольшие погрешности характерны для малых рыболовецких судов, качка которых характеризуется высокими частотами. Для оценки параметров качки таких судов целесообразно использовать ЭКД, построенный на базе микромеханического измерительного модуля, характеристики которого позволяют выработать параметры качки с точностью, соответствующей требованиям РМРС;
- применение комплементарного фильтра, который обеспечивает комплексирование показаний ММА и ММГ, чтобы скомпенсировать воздействие как переносных ускорений, так и погрешностей, вызванных дрейфом ММГ, в выходных сигналах датчиков, позволяет создать простую и легкорезализуемую измерительную схему ЭКД, повышающую надежность прибора;
- с помощью алгоритма выработки статического крена, показавшего хорошую точность во время стендовых испытаний макета прибора, обеспечивается информативность, необходимая для принятия решения об остойчивости судна.

Таким образом, создан макет прибора, удовлетворяющий требованиям РМРС. Принятые технические решения позволяют перейти к созданию серийных образцов ЭКД, которые можно устанавливать на суда различных типов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 23-29-00090.

ЛИТЕРАТУРА

1. [Электронный ресурс] Мера качки как важнейший параметр мореходных качеств судна. URL: <https://allbreakingnews.ru/mera-kachki-kak-vazhnejshij-parametr-morehodnyx-kachestv-sudna> (дата обращения: 15.05.2023).
2. [Электронный ресурс] URL: <https://versia.ru/19-yanvaryaya-1965-goda-iz-za-obledeneniya-pogibli-chetyre-rybolovnyx-traulera> (дата обращения: 09.02.2023).
3. Гембать Е.В. Анализ методов расчёта изменения угла крена судна при проведении операций с тяжеловесными грузами // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2015. №4. С. 55–62. URL: <https://rucont.ru/efd/484220> (дата обращения: 09.02.2023)
4. Fossen, T.I., Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, Wiley, 2011.
5. Правила по оборудованию морских судов. Часть V. Навигационное оборудование. Российский морской регистр судоходства С-Пб. 2020.
6. Resolution MSC.363(92) (Adopted on 14 June 2013) Performance Standards For Electronic Inclinometers.
7. [Электронный ресурс] URL: <https://navitron.co.uk/> (дата обращения: 09.02.2023).
8. [Электронный ресурс] URL: <https://www.pacatlantic.com/zollner/wp-content/uploads/sites/3/2015/04/Inclinometer-1.pdf> (дата обращения: 09.02.2023).
9. [Электронный ресурс] URL: <https://anhvucorp.com/en/shop/rongde-rdyb-510-marine-electronic-inclinometer-elm/> (дата обращения: 09.02.2023).
10. [Электронный ресурс] URL: http://www.navcom.ru/catalog/delta/delta_401/ (дата обращения: 09.02.2023).
11. [Электронный ресурс] URL: <https://ecs-sko.ru/catalog/equipment/detail/sudovoy-elektronnyy-krenometr-tip-delta-k/?print=pdf> (дата обращения: 09.02.2023).
12. [Электронный ресурс] URL: <https://www.kongsberg.com/maritime/products/vessel-reference-systems/motion-and-heading-sensors/mru/> (дата обращения: 09.02.2023).
13. Голованов П.Н., Попов А.Н., Сергушов И.В., Яшин А.Г., Алешкин В.В. Результаты испытаний инерциального измерительного блока в составе несущей системы беспилотного вертолета // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. №1(2).

14. **Борисова А.Ю., Смаль А.В.** Анализ разработок современных бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Инженерный вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. №5. <http://engsi.ru/doc/859644.html>.
15. **Анучин О.Н., Емельянец Г.И.** Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. СПб.: ГИЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 2003. С. 389.
16. **Min, H.G., Jeung, E.T.,** Complementary Filter Design for Angle Estimation using MEMS Accelerometer and Gyroscope. [Электронный ресурс] URL: http://www.academia.edu/6261055/Complementary_Filter_Design_for_Angle_Estimation_using_MEMS_Accelerometer_and_Gyroscope.
17. **Степанов О.А., Мансур М.** Алгоритмы комплексной обработки в задаче коррекции показаний навигационных систем при наличии нелинейных измерений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 6. С. 89–102.
18. **Ивойлов А.Ю.** О применении МЭМС-датчиков при разработке системы автоматической стабилизации двухколесного робота // Сборник научных трудов НГТУ. 2017. №3 (89). 32–51.
19. **Зо Мью Нанин, Щагин А.В., Ле Винь Тханг, Хтин Линн У.** Комплементарный фильтр для оценки угла с использованием микромеханической системы гироскопа и акселерометра // Инженерный вестник Дона. 2020. №3. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_7__2_Zaw_Myo-Naing_Shchagin.pdf_6749b2a99a.pdf.
20. **Colton, S.,** The Balance Filter. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2007, <https://b94be14129454da9cf7f056f5f8b89a9b17da0be.googledrive.com/host/0B0ZbiLZrqVa6Y2d3U-jFVWDhNZms/filter.pdf>.
21. **Матвеев В.В.** Анализ комплементарных фильтров при построении бескарданной гировертикали // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2019. №8. С. 153–164.
22. **Alam, F, He, Z.Z, Jia, H.J.,** A Comparative Analysis of Orientation Estimation Filters using MEMS based IMU, 2nd International Conference on Research science, Engineering and Technology, March 21–22, 2014, Dubia, pp.86–91.
23. **Liqiong Tang, Mukhopadhyay, S.C.,** MEMS based IMU for tilting measurement: Comparison of complementary and kalman filter based data fusion, IEEE 10-th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 23 November 2015, pp. 2005–2009.
24. **Матвеев В.В., Погорелов М.Г.** Анализ погрешностей микромеханических гироскопов методом вариаций Аллана // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2015. №3. С. 123–135.
25. **Депутатова Е.А., Гнусарев Д.С., Калихан Д.М.** Анализ шумовых составляющих кварцевого маятникового акселерометра с цифровым усилителем обратной связи // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. №6.
26. [Электронный ресурс] URL: <http://wc.matrixplus.ru/usbm06-003.htm> (дата обращения: 09.04.2023).

Gryazin, D.G., Paderina, T.V. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia) Development of a MEMS-Based Electronic Inclinometer Free from the Effect of Translational Accelerations, *Гироскопия и Навигация*, 2023, vol. 31, no. 2 (121), pp. 51–64.

Abstract. The paper discusses the errors of the most widespread mechanical ship-based lateral inclinometers installed on the ship bridge. There errors are caused by the effect of translational accelerations at the device installation point during pitching/rolling, and can reach significant values. To eliminate this problem, a new electronic inclinometer has been developed. Its operation algorithms, simulation and bench-test results are presented to confirm that the pitch/roll angles can be measured with the accuracy meeting the requirements of the Russian Maritime Registry of Shipping. The importance of measuring the heel of small fishing vessels to ensure their safe operation is emphasized. The accuracy of this parameter measurements taken with the new device is estimated.

Key words: Electronic inclinometer, micromechanical sensors, translational accelerations, complementary filter.

Материал поступил 13.04.2023