

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Бу Суан Хау

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО
МАГНИТНОГО КОМПАСА ДЛЯ МАЛОТОННАЖНЫХ МОРСКИХ
СУДОВ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(информатизация и связь)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена на кафедре радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

- Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Иванов Вячеслав Элизбарович
- Научный консультант: кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Кумков Сергей Иванович
- Официальные оппоненты: **Очин Евгений Федорович**, доктор технических наук, профессор, Академия им. Якуба Парадижа в г. Гожове Великопольском (Республика Польша), профессор кафедры информационных систем и компьютерных сетей технологического факультета;
- Ивлиев Андрей Дмитриевич**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», г. Екатеринбург, профессор кафедры математических и естественнонаучных дисциплин;
- Часовских Виктор Петрович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», г. Екатеринбург, профессор кафедры интеллектуальных систем

Защита диссертации состоится «01» декабря 2020 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета УрФУ 05.07.18 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=1598>

Автореферат разослан «__»_____2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сафиуллин Николай Тахирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень разработанности проблемы исследования

Компасные системы (КС) играют важную роль для определения направления движения морских судов. По показаниям КС оператор определяет траекторию движения, формирует координатную информацию для системы автоматического рулевого управления, определяет оптимальный маршрут корабля.

В настоящее время большинство малотоннажных судов, особенно морских рыболовных судов и внутренних судов Вьетнама, снабжены только традиционными магнитными компасами и не имеют современных гирокомпасов, которые обладают слишком высокой стоимостью. При этом существенным недостатком обычных магнитных компасов является невозможность их сопряжения с другими электронными системами судов.

В настоящее время ряд фирм производит сложные цифровые магнитные компасные системы (ЦМКС) для больших морских судов. Однако стоимость таких систем, расходы на их эксплуатацию, обслуживание и ремонт являются значительными. Кроме того, фирмы–производители не раскрывают технологии производства таких систем. Это затрудняет их внедрение в практику небольших рыболовных судов.

Таким образом, существует актуальная задача разработки и исследования недорогих, компактных, простых по конструкции и технологии производства ЦМКС с возможностью их комплексирования с другими электронными системами морских рыболовных судах. Разрабатываемый ЦМК должен обеспечивать повышенную точность определения азимута курса корабля, сравнимую с точностью серийных гирокомпасов, соответствовать требованиям стандартов на морскую аппаратуру. Особые требования предъявляются к повышению эксплуатационных характеристик и адаптации ЦМК для применения на небольших морских рыболовных судах.

Целью данной работы является разработка и исследование ЦМКС для малотоннажных морских судов на базе цифрового магнитного компаса (ЦМК), СВЧ приемного модуля позиционирования на основе использования сигналов ГНСС, приборов отображения азимута, применения методов цифровой фильтрации выходного сигнала для повышения точности разрабатываемой ЦМКС.

Основные задачи исследования

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить обзор теоретических вопросов, связанных с обоснованием, проектированием и изготовлением ЦМКС.
2. Исследовать и применить технологию цифровой фильтрации зашумленной информации на основе применения методов фильтра Калмана и интервальных оценок для повышения точности выходных показаний ЦМКС.

3. Разработать алгоритмы и программное обеспечение (ПО) для устройств входящих в состав ЦМКС.

4. Разработать и изготовить опытный образец ЦМКС. Провести экспериментальные исследования основных выходных характеристик и точности определения азимута разработанной ЦМКС на борту рыболовных судов в реальных морских условиях эксплуатации.

Объект исследования – цифровая магнитная компасная система.

Предмет исследования – структурная схема, алгоритмы и ПО управления и фильтрации координатной информации, методики испытаний и рекомендации для практического использования.

Новизна результатов и положений заключается в следующем.

1. Впервые предложен, реализован и исследован морской компас для малотоннажных морских судов, выполненный на основе комплексирования датчика магнитного поля Земли и модуля спутникового позиционирования на основе ГНСС.

2. В программе совместной обработки сигналов датчика магнитного поля Земли и модуля спутникового позиционирования на основе ГНСС в ЦМК для малотоннажных морских судов впервые использованы современные математические методы цифровой фильтрации зашумленной выходной информации ЦМК на основе применения фильтра Калмана в сочетании с методом интервальной фильтрации.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования:

1. Разработаны теоретические основы обработки информации в ЦМКС, выполненном на базе датчика магнитного поля, модуля спутникового позиционирования на основе ГНСС и применения методов фильтра Калмана и интервальной фильтрации.

2. Разработан простой, надежной и экономически выгодной ЦМКС для широкого использования на малотоннажных морских судах. Предлагаемый ЦМКС может использоваться в качестве резервной компасной системы в случае выхода из строя основной компасной системы на больших судах.

3. Испытания на вьетнамских судах показали перспективность широкого применения созданного ЦМКС также на внутреннем судоходстве страны.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

1. Совместное использование датчика магнитного поля и модуля спутникового позиционирования на основе ГНСС в сочетании с разработанными программными средствами значительно повысило точность выходных показаний ЦМКС для малотоннажных морских судов, которая стала сопоставимой с погрешностью стандартных морских гирокомпасов для больших морских судов в пределах 0.1–1.1 градуса.

2. Методы цифровой калмановской фильтрации помех, интервальных оценок и регрессионного анализа используемые в программном обеспечении обработки сигналов датчика магнитного поля и модуля спутникового позиционирования обеспечивают повышение точности и устойчивости показаний предложенного ЦМКС для малотоннажных морских судов.

3. Алгоритмы обработки сигналов датчика магнитного поля, модуля спутникового позиционирования, алгоритмы управления устройствами и блоками, входящими в состав ЦМКС, заложенные в программное обеспечение функционирования ЦМКС обеспечивают высокий уровень автоматизации и надежность процесса получения координатных данных, удобство эксплуатации для малотоннажных морских судов.

Личный вклад автора. Работа является самостоятельным исследованием. Основные результаты получены автором самостоятельно при методической помощи со стороны руководителя и научного консультанта. Вклад автора состоит в постановке задач исследования, получении основных теоретических результатов, разработке алгоритмов и программ для устройств ЦМКС, проведении всех экспериментальных исследований. Все разработки и научные результаты, выносимые на защиту и изложенные в тексте диссертации, получены самим автором или при его непосредственном участии. Экспериментальные исследования и программная реализация выполнялась автором лично.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационной работы использованы методы теории вероятности, математической статистики, теории матричного исчисления, компьютерного моделирования, а также экспериментальные исследования.

Достоверность результатов работы обеспечивается совпадением результатов выполненных расчетов и фактическими результатами натурных испытаний ЦМКС на судах во Вьетнаме. Погрешность выходного значения азимута ЦМК определяется его непосредственным сравнением с выходным значением стандартного гирокомпаса на борту.

Апробация результатов и публикации

По теме диссертации опубликовано 10 работ, отражающих основные положения исследования, среди которых 4 статьи в журналах, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ, включая 3 статьи в изданиях, индексируемых в международной цитатно-аналитической базе Scopus.

Основные результаты работы были представлены диссертантом лично на следующих конференциях:

1. Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO), Cape Town, South Africa, 25–28 Sept. 2017.

2. Международная (49–й Всероссийской) молодёжная школа–конференция «Современные проблемы математики и её приложений», Екатеринбург, Институт математики и механики УрО РАН, УрФУ, 2018.

3. Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT 2018), Yekaterinburg, Russia, 6–8. May, 2018.

4. Международная (29–я) Крымская Конференция «СВЧ–техника и Телекоммуникационные Технологии» (КрыМиКо'2019), г. Севастополь, Россия, 2019.

5. Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT), Yekaterinburg, Russia, 14–15. May, 2020.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы успешно используются в компаниях «Maritime trading and service technology Co., LTD», «Thao Linh DMTCO, LTD» и на ряде вьетнамских судов.

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 87 наименований и 4-х Приложений. Содержит 173 страницы, 119 рисунков и 10 таблиц. Диссертация выполнена на кафедре радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований, формулируется цель, ставятся задачи, отражаются научная новизна и практическая значимость представляемой работы, формулируются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор теоретических вопросов, связанных с обоснованием, проектированием и изготовлением ЦМКС.

Изучена теория магнитного поля Земли. изучены его параметры, вводится в рассмотрение уравнение, определяющее направление вектора магнитного поля Земли измеряют две его составляющие по оси X и оси Y.

Рассмотрены параметры, характеристики, преимущества и недостатки магнитных компасов, используемых в практике морского судоходства.

Изучены принципы работы и структура американской глобальной навигационной спутниковой системы (GPS) и российской (ГЛОНАСС). Приведены уравнения для определения местоположения любого объекта, находящегося на поверхности Земли в любое время и с высокой точностью и достаточной надежностью путем решения навигационной задачи с помощью системы основных уравнений GPS. на основе обработки информации о координатах из модуля сбора сигналов ГНСС, а затем разработки метода определения азимута судна (представлен в следующих главах). Дана оценка влияния множества факторов на точность определения координат потребителя. Значение погрешности GPS/ГЛОНАСС будет получена в результате суммирования всех погрешности от различных источников. В результате исследования показано, что типовая погрешность гражданской приемной аппаратуры составляет приблизительно 1,5-10 м для системы GPS и 5-15 м для системы ГЛОНАСС.

В этой главе также представлен морской протокол NMEA0183. Это обязательный протокол связи для морского оборудования и систем. ЦМКС был разработан с использованием формата протокола NMEA0183 в качестве формата пакета компаса для связи с другими устройствами и системами на борту.

Во второй главе рассмотрены теоретические основы фильтрации зашумленной информации и описан процесс разработки составных устройств ЦМКС (Рис. 1).

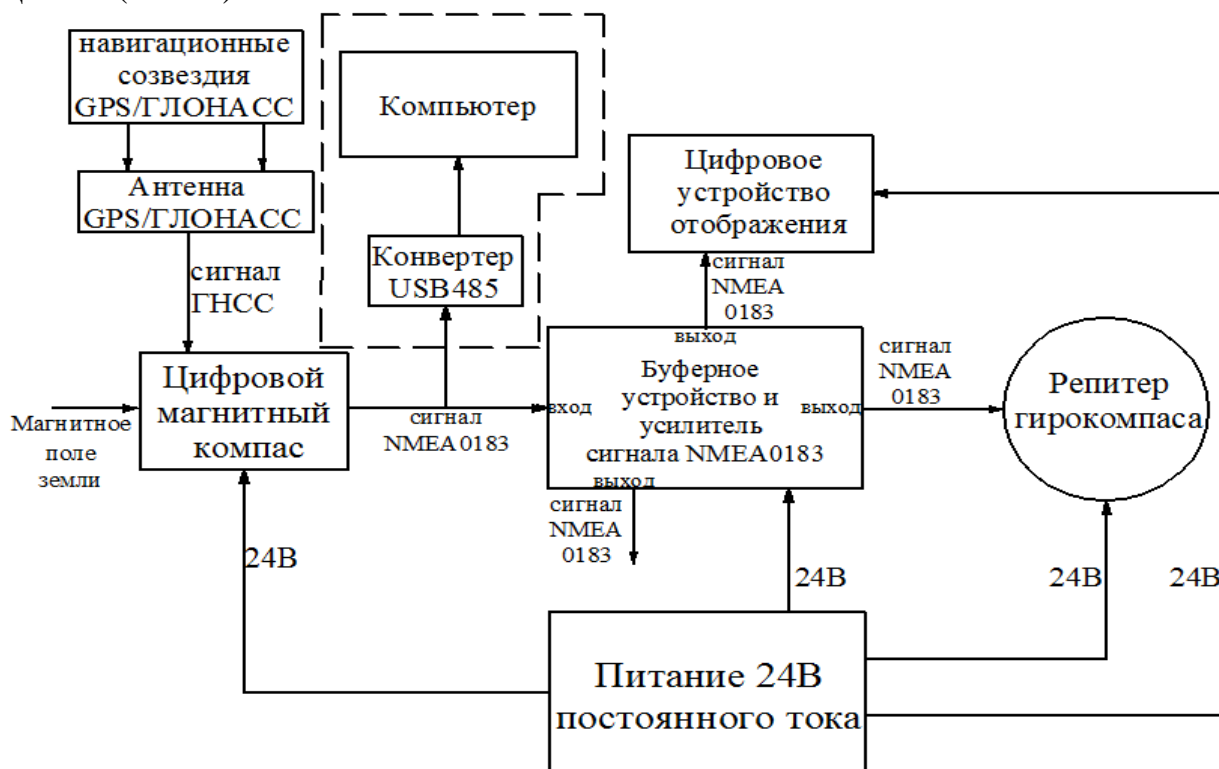


Рисунок 1. Структура ЦМКС

В разделе 2.1 «Теории методов фильтрации Калмана и интервальных оценок» рассмотрены теоретические основы методов фильтрации Калмана и интервальных оценок, обоснованы возможности применения отмеченных методов для уменьшения шума выходного сигнала ЦМК в условиях эксплуатации.

В разделе 2.2 «Разработка ЦМК» подробно описан процесс аппаратного обеспечения и производства ЦМК. Структура и схема после проектирования ЦМК показаны на рис. 2а и 2б соответственно. Результаты изготовления устройств входящих в состав ЦМК показаны на рис. 3.

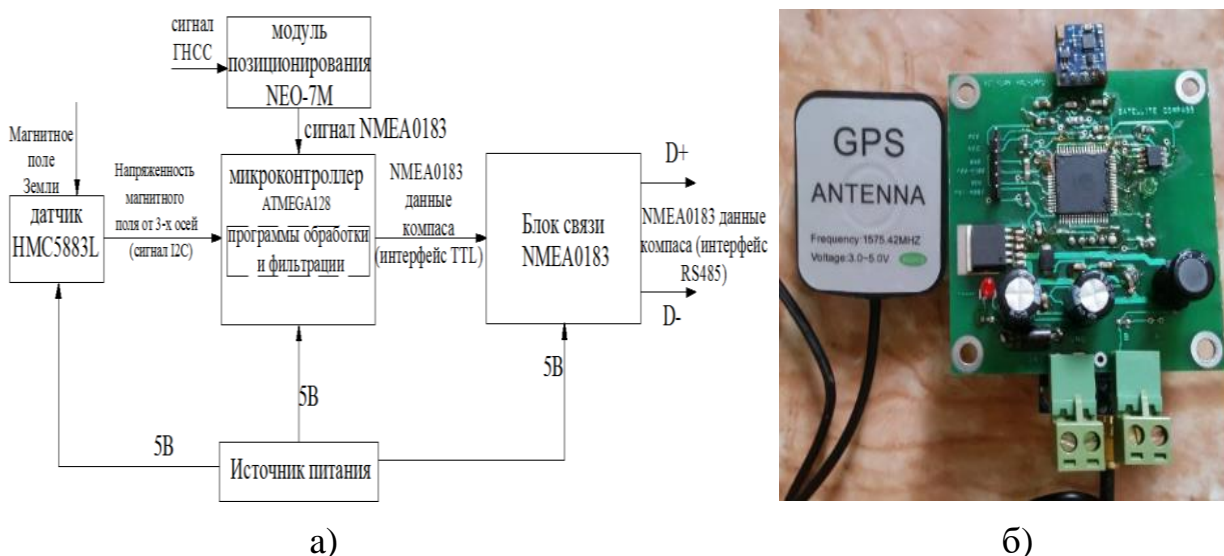


Рисунок 2 – Структура (а) и схема после изготовления (б) ЦМК

Микроконтроллер ATMEGA128 внутри устройства программируется с использованием соответствующих программ обработки информации и методов фильтрации помех. При использовании датчика HMC5883L и модуля NEO-7M для изготовления ЦМК и комбинировании с использованием методов фильтрации шума видно, что ошибка ЦМК мала (меньше 2 градусов). Разработанная ЦМК имеет следующие основные параметры:



Рисунок 3 – Вид ЦМК и его размещение в корпусе
 входное питание от 12 до 36 В постоянного тока; потребляемый электрический ток 0.2 А; потребляемая мощность не более 4 Вт; входные сигналы от датчика HMC5883L и модуля NEO-7M; выходной сигнал пакета NMEA0183 в соответствии со стандартом RS485; влагозащищенность по стандарту IPX6.

В разделе 2.3 «Разработка устройства цифрового отображения» представлен процесс разработки аппаратного обеспечения для устройства цифрового отображения (рис. 4, 5).

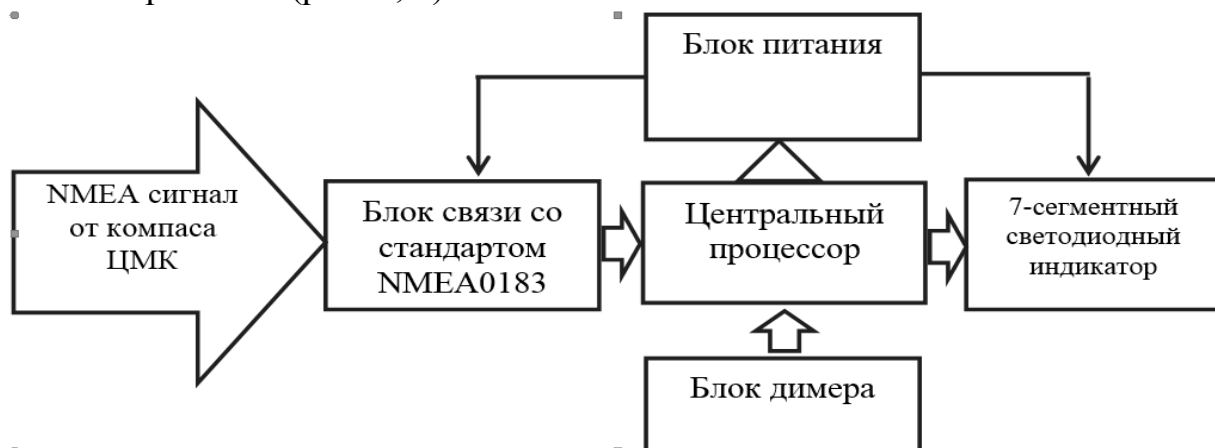


Рисунок 4 – Структура устройства цифрового отображения

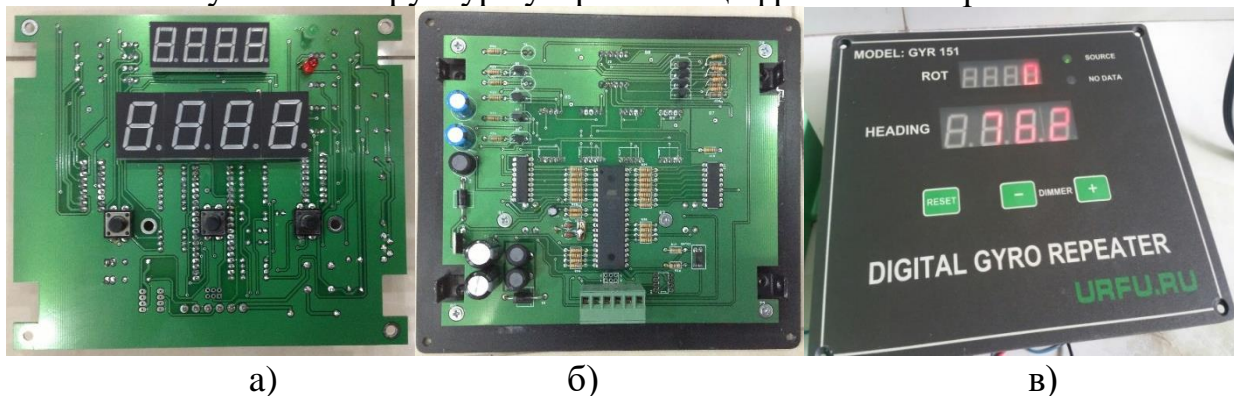


Рисунок 5 – Лицевой вид устройства отображения (а) и вид снизу на плату устройства отображения (б) и общий вид комплекта цифрового устройства отображения (в)

Устройство цифрового отображения, предназначенное для отображения курса и скорости поворота корабля восьми семисегментными светодиодами. Его основные параметры: входной сигнал пакетные данные NMEA0183 в формате стандарта RS485; влагозащещенность в соответствии со стандартом IPX6.

В разделе 2.4 «Разработка репитера гирокомпаса» представлен процесс проектирования, изготовления репитера гирокомпаса, а также его работа. Структура репитера гирокомпаса и схема управления устройством показаны на Рис. 6;

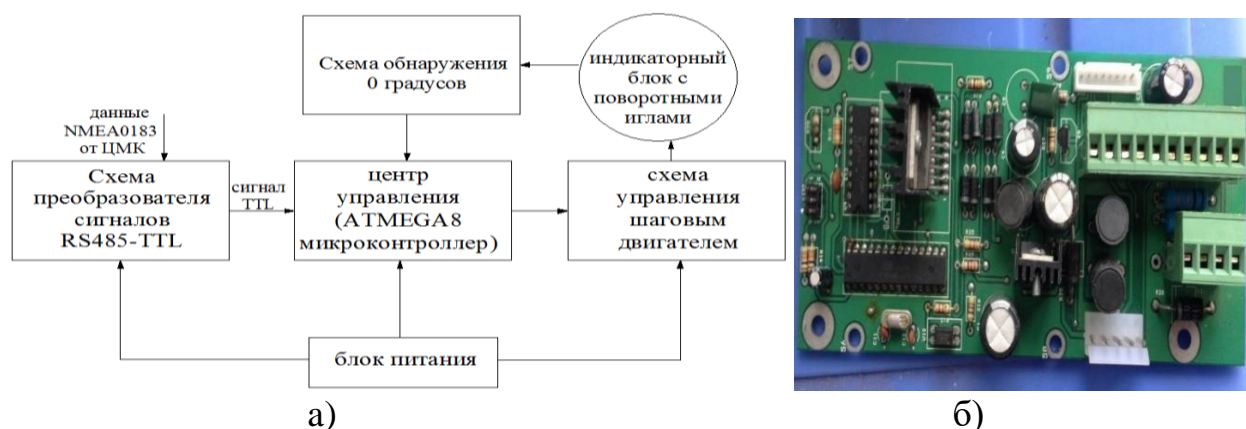


Рисунок 6 – Структура репитера гирокомпаса (а) и схема управления устройством (б)

Результаты проектирования и изготовления оборудования репитера гирокомпаса показаны на рис.7.



Рисунок 7 – Результаты разработки репитера гирокомпаса

Репитер гирокомпаса, предназначенный для отображения направления движения судна в форме “вращающихся стрелок”. Входной сигнал NMEA0183 поступает из ЦМК. Преимущества этого устройства заключаются в его прочности, эстетичности, возможности выдерживать жесткие внешние условия эксплуатации. Недостатком этого устройства является то, что он сделан полностью в металлическом исполнении, что делает его изготовление сложным и дорогостоящим. Его основные параметры: входной сигнал данные в пакетах NMEA0183 в формате стандарта RS485; влагозащещенность по стандарту IPX6.

В третьей главе представлены программные алгоритмы для составных устройств ЦМКС.

В разделе 3.1 «Разработка программного обеспечения ЦМК» представлен алгоритм программирования микроконтроллера ATMEGA128 ЦМК, который включает необходимые подпрограммы. Представим описание основных подпрограмм.

Подпрограмма приема и обработки сигналов от датчика HMC5883L. Подпрограмма на основе значений, полученных от датчика HMC5883L (магниторезистивный трехосевой магнитометр с цифровым выходом) считывает азимут α компаса по формуле.

$$\alpha = \begin{cases} 90 - \arctan\left(\frac{H_x}{H_y}\right) * \frac{180}{\pi}, & \text{if } H_y > 0, \\ 270 - \arctan\left(\frac{H_x}{H_y}\right) * \frac{180}{\pi}, & \text{if } H_y < 0, \\ 180 & \text{, if } H_y = 0, H_x < 0, \\ 0 & \text{, if } H_y = 0, H_x > 0. \end{cases} \quad (1)$$

где H_x, H_y — значения напряженности магнитного поля по осям x и y (содержатся в регистре HMC5883L).

Подпрограмма приема и обработки сигналов от модуля NEO-7M.

Во время работы микроконтроллер ATMEGA128 непрерывно принимает пакеты данных NMEA0183 от модуля NEO-7M в следующем виде:

$\$GNRMC,hhmmss.sss,A,GGMM.MMMM,P,gggmm.mmmm,J,x.x,u,u,ddmmyy,,,v*h$
 $h<CR><LF>$. Значение полей:

«GN» — идентификатор источника, в приведенном примере это ГЛОНАСС+GPS; «hhmmss.sss» — время фиксации местоположения по Всемирному координированному времени UTC: «hh» — часы, «mm» — минуты, «ss.sss» — секунды. Длина дробной части секунд варьируется. Лидирующие нули не опускаются; «A» — статус: «A» — данные достоверны, «V» — недостоверны; «GGMM.MMMM» — широта. 2 цифры градусов («GG»), 2 цифры целых минут, точка и дробная часть минут переменной длины. Лидирующие нули не опускаются; «P» — «N» для северной или «S» для южной широты; «gggmm.mmmm» — долгота. 3 цифры градусов («ggg»), 2 цифры целых минут, точка и дробная часть минут переменной длины. Лидирующие нули не опускаются; «v» — индикатор режима: «A» — автономный, «D» — дифференциальный, «E» — аппроксимация, «N» — недостоверные данные (часто отсутствует, данное поле включая запятую отсутствует в старых версиях NMEA); «hh» — контрольная сумма.

Чтобы обработать данные NMEA0183, полученные из модуля NEO-7M, подпрограмма выполняет объявление массива данных $Array_gps[i](i=0 \rightarrow 50)$, содержащего этот пакет данных NMEA0183. Символы, содержащие информацию о долготе и широте, хранятся в элементах массива $Array_gps[i](i=20 \rightarrow 25)$ и $Array_gps[i](i=32 \rightarrow 38)$. В конкретный момент движения корабля значения его широты (Lat) и долготы (Lon) определяется следующим командованием:

$$\begin{aligned}
Lat &= Array_gps[20]*10000+Array_gps[21]*1000+Array_gps[22]*100+ \\
&Array_gps[23]*10+ Array_gps[25]; \\
Lat &= Lat/10;
\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
Lon &= Array_gps[32]*100000+Array_gps[33]*10000+Array_gps[34]*1000+ \\
&Array_gps[35]*100+ Array_gps[36]*10+ Array_gps[38]; \\
Lon &= Lon/10.
\end{aligned}$$

В случае передвижения корабля с точки А до точки В, с помощью командования (2) получаем последовательно значения $lonA$, $latA$, $lonB$ и $latB$, представляющие собой широту и долготу судна в двух точках А и В (Рис. 8).

На основе перечисленных значений компоненты Δlat и Δlon рассчитываются по формулам:

$$\Delta lat = \ln \frac{\tan(latB / 2 + 45)}{\tan(latA / 2 + 45)}, \tag{3}$$

$$\Delta lon = abs(lonA - lonB). \tag{4}$$

Направление β движения судна определяется по следующей формуле:

$$\beta = a \tan 2(\Delta lon, \Delta lat). \tag{5}$$

Функция расчета азимута на основе сигнала ГНСС работает только в случае движения судна (в случае использования только одной антенны ГНСС).

Подпрограмма расчёта значения азимута ψ на основе значений α и β . При движении корабля с большой скоростью, обработка сигнала от модуля NEO-7M дает более точную оценку направления движения судна. Но полученный азимут в результате обработки сигнала от датчика НМС5883L оказываются менее точными из-за помех, обусловленных хаотическим движением корабля. Когда корабль движется с малой скоростью или стоит на месте, использование датчика НМС5883L является более предпочтительным. На основании расчетов и фактического тестирования ЦМК автор пришел к выводу, что наиболее точный совокупный выходной азимут ЦМК рассчитывается по формуле:

$$\psi = 0.17(\alpha + 5 * \beta). \tag{6}$$

где ψ - нефильтованное значение ЦМК на основе расчета двух сигналов позиционирования и магнитного поля.

Алгоритм Калмана для обработки зашумленного выходного сигнала ЦМК. Структура алгоритма фильтра Калмана для микроконтроллера ATMEGA128 показана на рис. 9. Алгоритм состоит из двух повторяющихся фаз: предсказание и корректировка. Первая задача при запуске алгоритма -

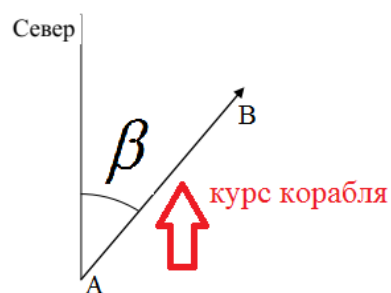


Рисунок 8 – азимут β – направление движения корабля

объявить и присвоить начальные значения переменным следующим образом: $angle=0$, $next=0$, $Index=0$, $P_k=0$, $P_k=0$, $Q=0.003$, $Kk=0$, $xk=0$, $x_k=0$, $\psi=0$, $\alpha=0$, $\beta=0$, $R=2$. В алгоритме используется переменная $Index$ для выбора шага работы фильтра. Если $Index = 0$, то реализуются формулы предсказания. Если $Index = 1$, то реализуются формулы корректировки. В последнем случае, микроконтроллер обрабатывает и рассчитывает азимут на основе комбинации значений α и β и вычисляет коэффициенты Kk , xk , Pk . Переменная $next$ определяет продолжительность одного цикла фильтрации. Если $next = 150$, выходной сигнал фильтра обновляется через каждые 3 секунды. Значение переменной $angle$ является выходным значением фильтра, которое формирует пакет данных NMEA0183 для передачи на устройства отображения «\$HEHDT, $angle$,T*YY». Здесь символы «HEHDT» являются символами, специфичными для данных NMEA0183 компаса, «YY» — контрольная сумма.

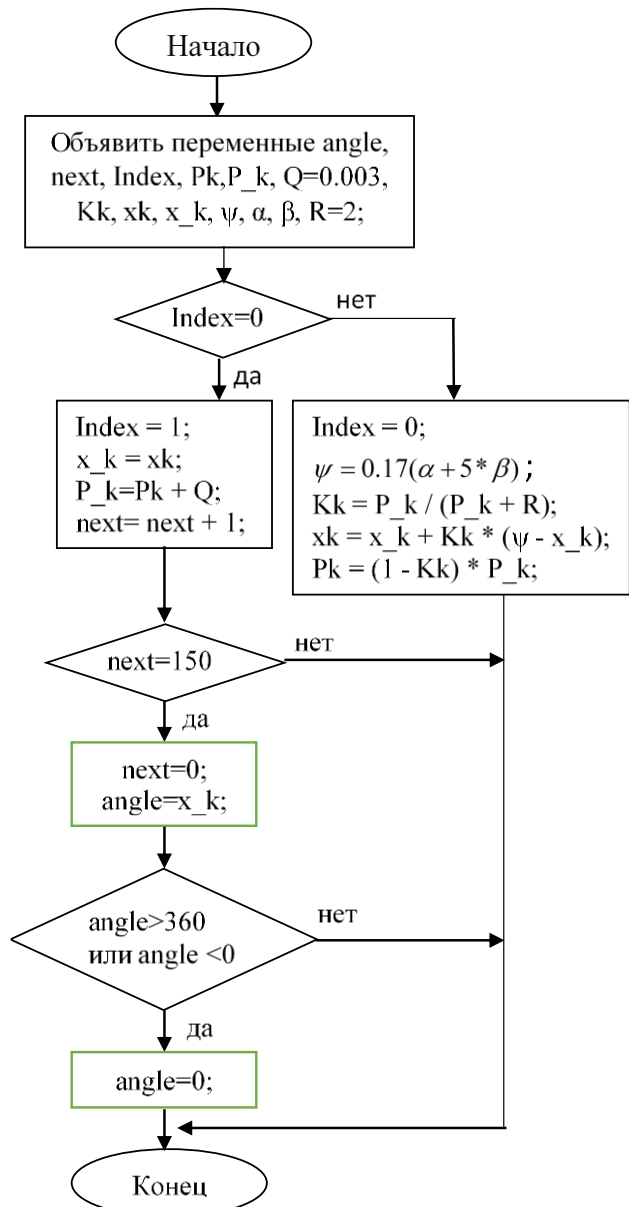


Рисунок 9 – Алгоритм фильтра Калмана для микроконтроллера ATMEGA128

Результаты моделирования фильтра Калмана на Matlab показаны на рис. 10. В процессе моделирования фильтруемые значения азимута создаются суммой значения реального азимута (10 градусов) и случайного шума. Красная линия представляет выходное значение фильтра.

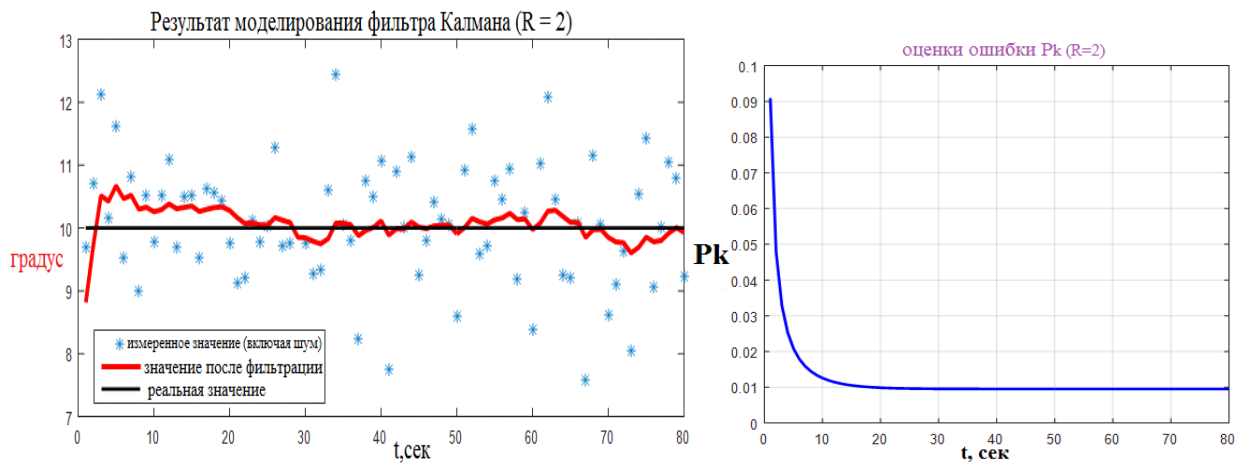


Рисунок 10 – Результаты моделирования фильтра Калмана и коэффициента P_k на Matlab (в случае коэффициент $R = 2$)

В процессе моделирования на Matlab выявлено, что параметр фильтра $R = 2$ является наиболее подходящим, когда красная линия ближе всего к черной линии (реальное значение). Параметр P_k (предсказание ошибки) характеризует скорость отклика фильтра. Согласно результатам на рис. 10, после 80 измерений P_k сходится к значению 0.01.

Алгоритм фильтрации с применением интервального подхода для микроконтроллера ATMEGA128 внутри ЦМК (Рис. 11).

Алгоритм фильтрации с применением интервального подхода для микроконтроллера ATMEGA128 внутри ЦМК показан на рис.14. Чтобы выполнить фильтрацию методом интервального подхода, программа использует 10 значений $\psi[i](i=0 \rightarrow 10)$ полученных за 10 раз обработки сигналов от датчиков НМС5883 и NEO-7М. Суть алгоритма фильтрации с применением интервального подхода состоит в том, чтобы найти два самых больших и самых маленьких числа двух массивов ($A[i] - e_{max}$) ($i=0 \rightarrow 10$) и ($B[i] + e_{max}$) ($i=0 \rightarrow 10$). После нахождения 2 самых больших и самых маленьких значений 2 массивов, значение азимута после фильтрации шума вычисляется по формуле 7.

$$\psi_T = 0.5 * (\psi_{max} + \psi_{min}); \quad (7)$$

а искомая оценка её точности вычисляется как

$$d\psi = \psi_{max} - \psi_{min} \quad (8)$$

Значение переменной ψ_T является выходным значением фильтра с устранением шума, которое в сочетании с необходимыми знаками формируется пакет данных NMEA0183 для передачи на устройства отображения. Структура такого пакета данных: “\$HEHDT, ψ_T , T*YY”.



Рисунок 11 – Алгоритм фильтрации с применением интервального подхода для микроконтроллера ATMEGA128 внутри ЦМК

В Разделе 3.2 «Программное обеспечение для цифрового устройства отображения» описан алгоритм программирования цифровых устройств отображения, приведен в диссертации Приложении 1б.

В Разделе 3.3 «Разработка программного обеспечения для репитера гироскопа» описан алгоритм программирования репитера гироскопа, приведен в диссертации в Приложении 1в.

В четвертой Главе представлены результаты изготовления (Рис.12а) и испытаний ЦМКС на судах во Вьетнаме.



а) б)
Рисунок 12 – Исследовательский стенд с реальной ЦМКС (а) и интерфейс ПО для тестирования ЦМК (б)

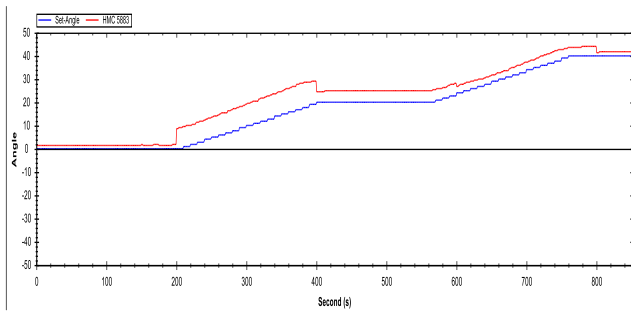
Тестирование ЦМК

Для испытания ЦМК было создано на ПО С# специальное приложение (Рис.12.б), предназначенное для отображения характерных линий ЦМК и стандартного гироскопа корабля в виде графика с течением времени. Процесс испытания включает следующие шаги:

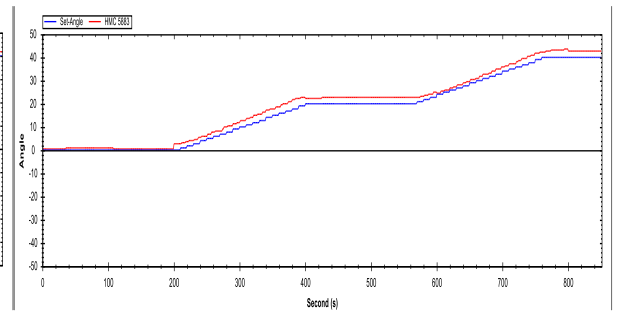
- перевести корабль в Северное направление в течение 200 секунд;
- повернуть корабль вправо на 20 градусов в течение 200 секунд, а затем сохранить данное направление в течение 200 секунд;
- продолжать поворот еще на 20 градусов в течение 200 секунд и сохранять полученное направление в течение оставшихся 200 секунд;
- зафиксировать изменения значений стандартного электрического компаса и ЦМК;
- повторить вышеуказанные операции с тестом поворота влево на 20 градусов.

Приведем результаты тестов в разных случаях в виде графиков характерных линий, в которых красная – характерная линия выхода ЦМК; синяя – характерная линия стандартного гироскопа корабля, отражающая желаемое значение азимута (ближайшее к истинному).

Экспериментальные результаты, когда ЦМК использует только датчик HMC5883L

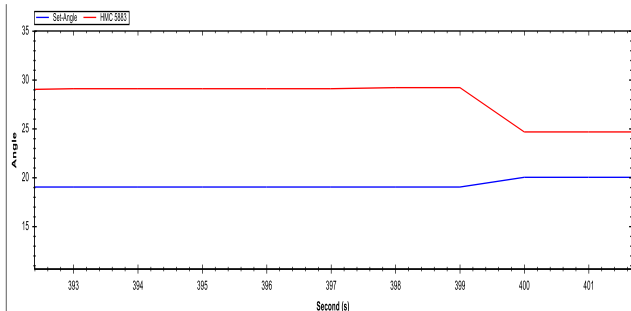


а) без фильтра Калмана

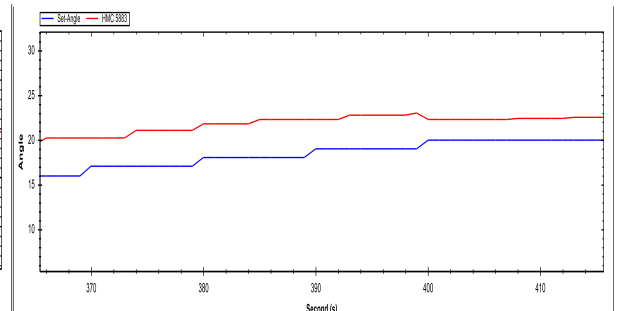


б) с фильтром Калмана

Рисунок 13 – Результаты теста, когда ЦМК использует только датчик HMC5883L (поворот корабля вправо)

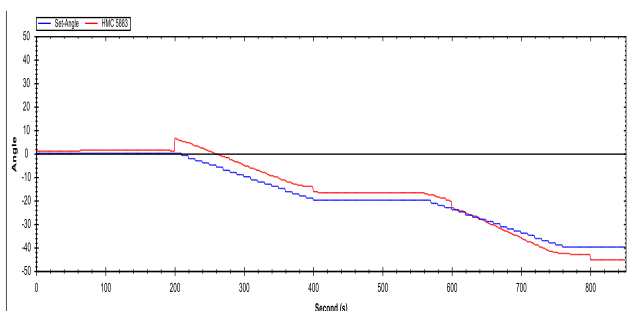


а) без фильтра Калмана

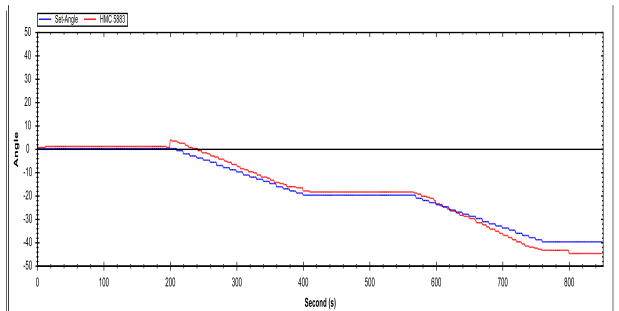


б) с фильтром Калмана

Рисунок 14 – График, показывающий максимальное отклонение, когда ЦМК использует только датчик HMC5883L (поворот корабля вправо)

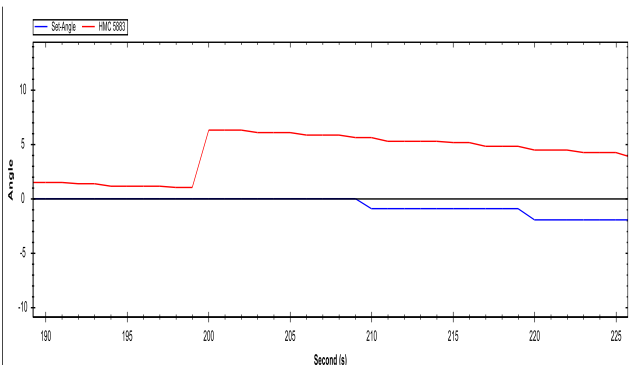


а) без фильтра Калмана

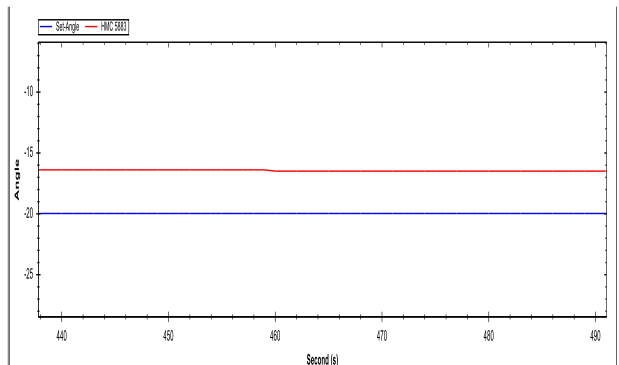


б) с фильтром Калмана

Рисунок 15 – Результаты теста, когда ЦМК использует только датчик HMC5883L (поворот корабля влево)



а) без фильтра Калмана

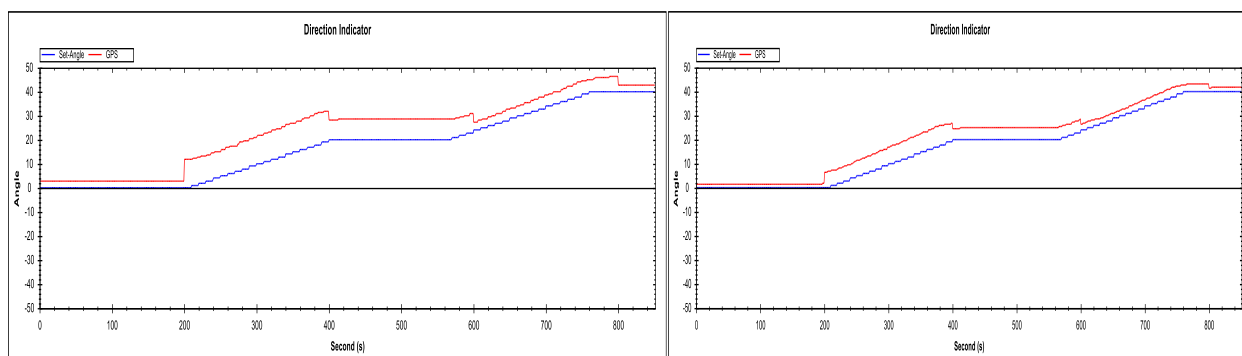


б) с фильтром Калмана

Рисунок 16 – График, показывающий максимальное отклонение, когда ЦМК использует только датчика HMC5883L (поворот корабля влево)

В рассматриваемом случае при работе без фильтра Калмана выходное значение ЦМК имеет большие погрешности (до 10 градусов), с помощью фильтра Калмана уровень погрешности существенно снижается (до 4 градусов).

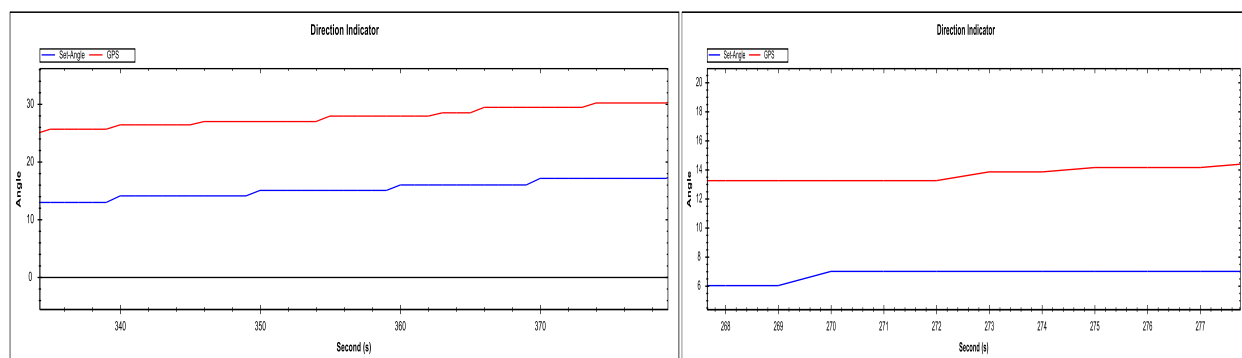
Экспериментальные результаты, когда ЦМК использует только модуль NEO-7M



а) без фильтра Калмана

б) с фильтром Калмана

Рисунок 17 – Экспериментальные результаты, когда ЦМК использует только модуль NEO-7M



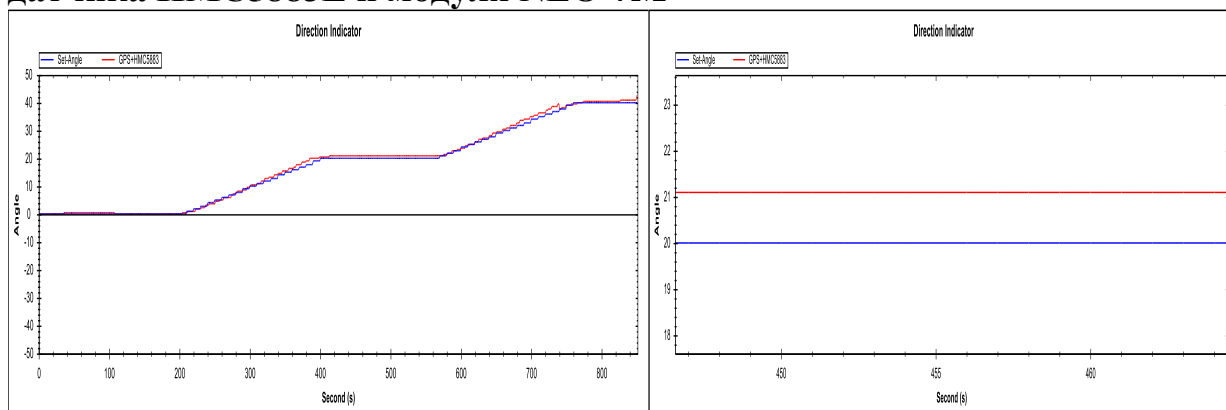
а) без фильтра Калмана

б) с фильтром Калмана

Рисунок 18 – На графике показано наибольшее отклонение, когда ЦМК использует модуль NEO-7M

В рассматриваемом случае при работе без фильтра Калмана выходное значение ЦМК имеет большие погрешности (до 14 градусов), с помощью фильтра Калмана уровень погрешности существенно снижается (до 7.5 градусов).

Результаты испытаний ЦМК при одновременном использовании датчика HMC5883L и модуля NEO-7M



а)

б)

Рисунок 19 – Измеренный сигнал из ЦМК и стандартного гирокомпаса корабля при одновременном использовании датчика HMC5883L и модуля NEO-7M (а), Наибольшее отклонение измерений ЦМК от сигнала стандартного гирокомпаса корабля при одновременном использовании датчика HMC5883L и модуля NEO-7M (б)

Результаты испытаний, показанные на Рис. 19, позволяют сделать вывод о том, что при использовании датчика HMC5883L и модуля NEO-7M для изготовления ЦМК (и при использовании микроконтроллера ATMEGA128 ЦМК программы фильтра Калмана) выходный сигнал ЦМК имеет наименьшую погрешность по сравнению с выходным сигналом стандартного электрического компаса (1.1 градуса).

Результат фильтрации шумового сигнала для ЦМК на основе интервального подхода.

После окончания использования датчика HMC5883L и модуля NEO-7M, процедура использует интервальный подход и загружает программу в память микроконтроллера ATMEGA128 для тестирования.

Случай постоянного магнитного угла (Рис. 20). Файл реальной выборки (моменты замеров t_n и зашумленные измерения ψ_n магнитного угла) и результаты обработки приведены на Рис. 23. Длина выборки $N = 23$ замера, данные поступали с тактом dt 1 или 2 сек, полное время наблюдения $T = 34$ сек, $e_{\max} = 1.59$ градуса, истинный азимут $\Psi = 228.3$ градуса (определяется стандартным гирокомпасом корабля). Здесь замеры магнитного угла нанесены крестиками. Интервалы неопределённости H_n замеров отмечены вертикальными отрезками. Жирный вертикальный отрезок в последний момент наблюдения – интервальная оценка $I_T(\psi)$ допустимых значений угла с верхней $^+\psi$ и нижней $^-\psi$ границами (штрих-пунктирные линии). В конечный момент времени наблюдения оцениваемые параметры принимают следующие численные значения:

– для интервального оценивания верхняя граница $^+\psi = 228.6$ градуса, нижняя граница $^-\psi = 228.4$ градуса, средняя выходная величина $\psi_T = 228.5$ градуса, полуразмах её интервала (точность) $d\psi = 0.1$ градуса.

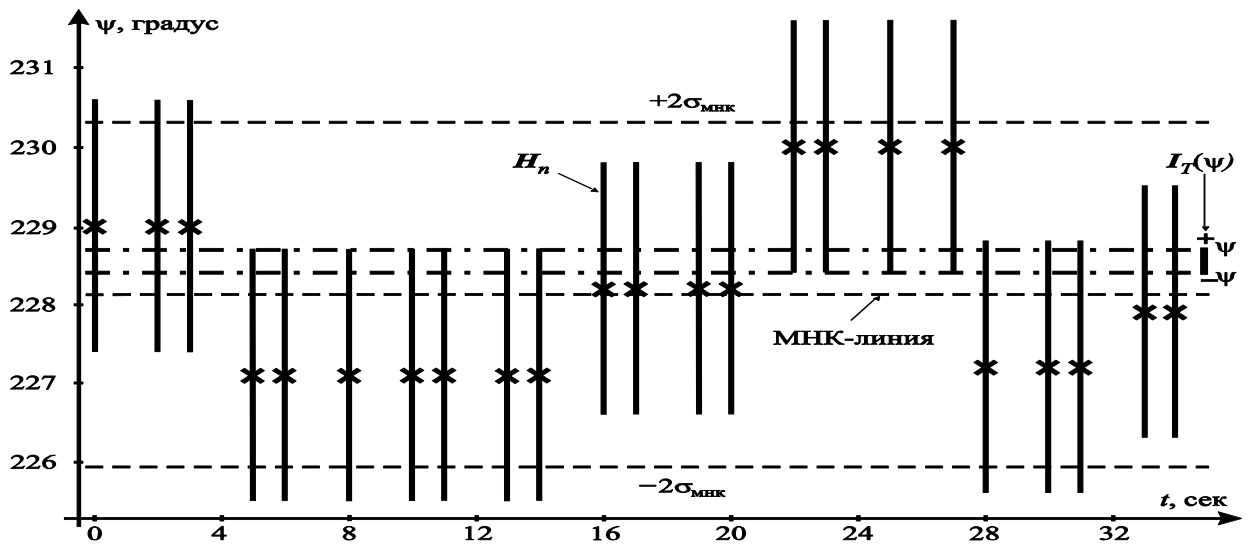


Рисунок 20 – Пример обработки данных ЦМК; судно стоит у пирса с постоянным курсом

Случай переменного магнитного угла.

На интервале времени наблюдения судно выполняет разворот с некоторой постоянной скоростью. Файл реальной выборки (моменты замеров t_n и зашумленные измерения ψ_n магнитного угла, крестиками) приведён на Рис. 21. Длина выборки замеров $N = 30$, замеры поступают с тактами dt 1 и 2

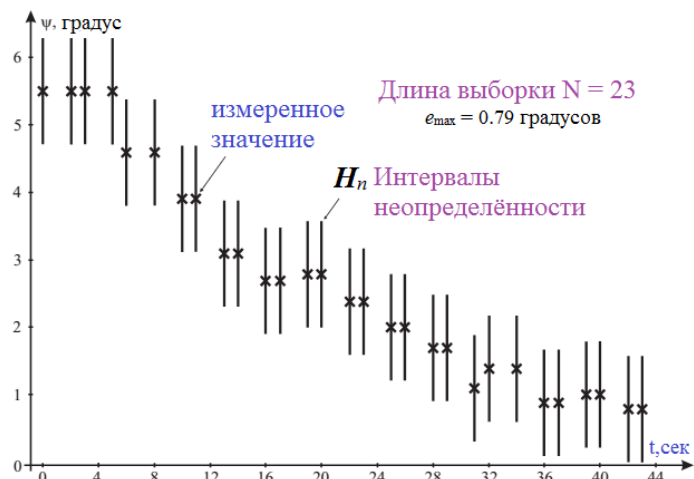


Рисунок 21 – Пример обработки данных ЦМК; судно разворачивается с постоянной скоростью

сек, полное время наблюдения $T = 43$ сек, $e_{max} = 0.79$ градусов. Выполняется оценивание множества $I(\psi_n, \omega)$ допустимых значений магнитного угла и угловой скорости разворота судна.

Результаты построения искомого множества $I(\psi_n, \omega)$ значений параметров (ψ_n, ω) представлены на Рис. 22. Результаты обработки данного файла принимают следующие численные значения (Рис. 23):

– оценки по методом наименьших квадратов (МНК) составляли $\psi_{но,МНК} = 5.23$ градуса, $\omega_{МНК} = -0.117$ градусов/сек, СКО $\sigma_{МНК} = 0.399$ градусов; интервал начального значения (с учетом величин $\pm 2\sigma_{МНК}$) ${}_{-}\psi_{н,МНК} = 4.32$ градуса, ${}^{+}\psi_{н,МНК} = 6.03$ градуса, интервал значения скорости (с учетом длины интервала наблюдения T) ${}_{-}\omega_{МНК} = -0.157$ градуса/сек, ${}^{+}\omega_{МНК} = -0.077$ градуса/сек;

– для интервального оценивания безусловный минимальный внешний интервал ${}_{-}\psi_n = 5.26$ градуса, ${}^{+}\psi_n = 5.55$ градуса, интервал скорости ${}_{-}\omega = -0.128$ градуса/сек, ${}^{+}\omega = -0.110$ градуса/сек; выходная средняя точка информационного множества $\psi_{н,ср} = 5.40$ градуса и $\omega_{ср} = -0.119$ градуса/сек.

Из сравнения этих данных и Рис.23 следует, что интервальный подход, благодаря учету ограничения e_{\max} на погрешность измерения угла, дает гораздо более точные гарантированные оценки параметров процесса изменения курса и более точную трубку допустимых зависимостей.

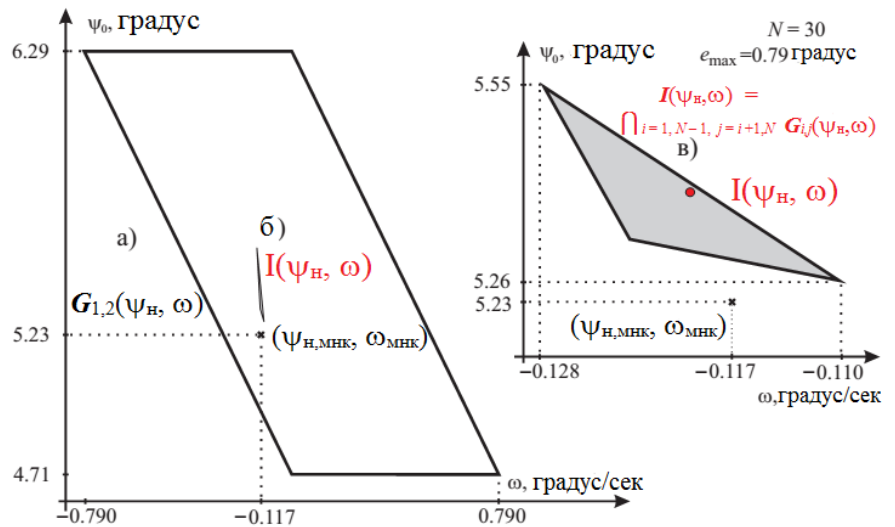


Рисунок 22 – Движение судна с разворотом; оценка информационного множества параметров (ψ_n, ω) ; а) грубая оценка по двум первым замерам; б) сравнительный размер множества в мелком масштабе; в) информационное множество (увеличено); крестик – точка по методом наименьших квадратов (МНК)

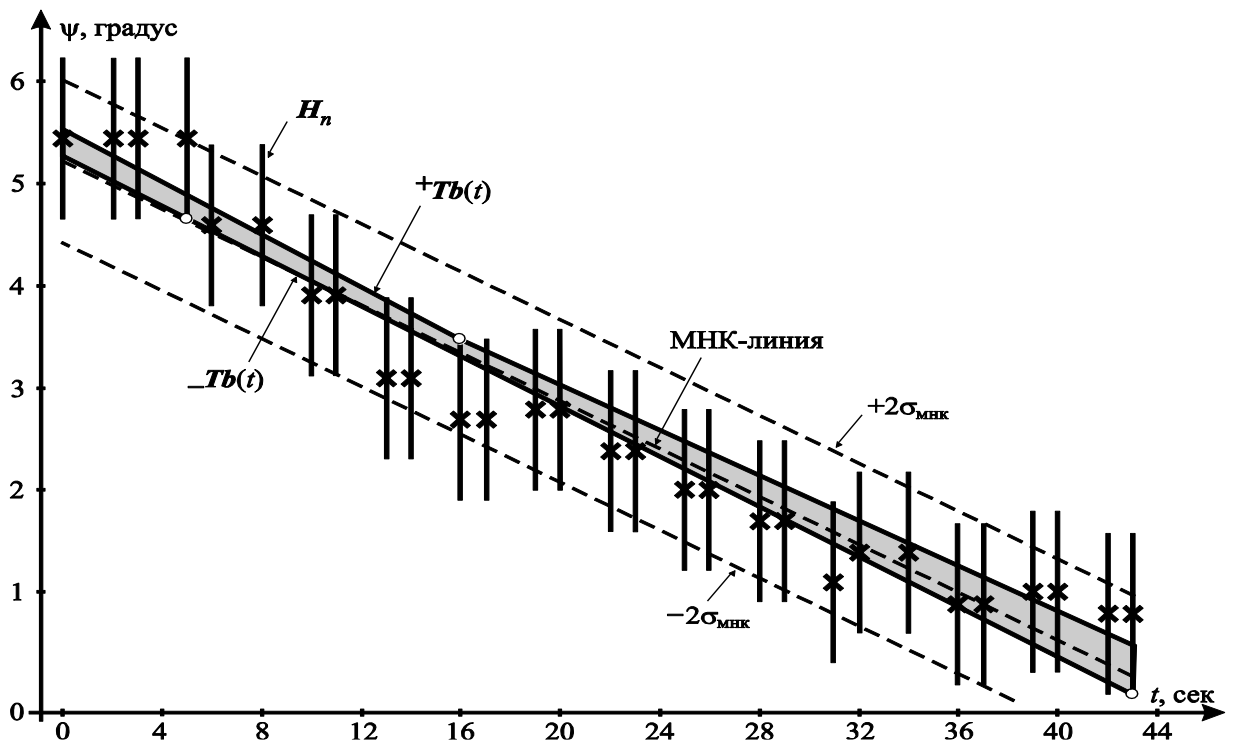


Рисунок 23 – Движение судна с разворотом; трубка допустимых зависимостей (серая заливка); оценка по МНК и $\pm 2\sigma$ границы этой оценки (штриховые линии)

Тестирование индикаторных устройств в составе системы

Для проведения теста индикаторные устройства подключаются к компьютеру с помощью преобразователя USB485. На компьютере было установлена ПО (Рис. 24б), имеющее функции генерации сигнала компаса в формате NMEA0183 и передачи на индикаторные устройства. Схема подключения

компьютера и тестовых устройств показана на Рис. 24а. Результаты испытаний индикаторных устройств, представленные в Таб. 1, показывает, что индикаторные устройства были разработаны в полном соответствии с техническими стандартами и могут использоваться на судах: значения азимута, отображаемые на устройстве и на компьютере, имеют небольшие отклонения.



Рисунок 24 – Схема подключения компьютера и тестовых устройств (а), Интерфейс программного обеспечения для тестирования индикаторных устройств (б)

Таблица 1. Результаты испытаний индикаторных устройств

Угол заданный на компьютере, градусы	Показание индикаторного устройства, градусы	Погрешность, градусы	Оценка погрешности
0.0	0.1	0.1	хорошо
128.5	128.6	0.1	хорошо
250.1	250.2	0.1	хорошо
338.4	338.3	0.1	хорошо

В Заключение обобщаются основные результаты научных исследований, разработки, изготовления и практических испытаний ЦМКС. Из этих результатов следует, что поставленная цель работы достигнута, а именно: выполнены разработка и исследование цифровой магнитной компасной системы для оснащения малотоннажных морских судов. Более подробно достигнутые при этом научные, технические и иные результаты состоят в следующем.

1. Разработана структура предлагаемой ЦМКС отвечающая требованиям стандартам ИМО для компасных систем морских судов на основе совместного применения датчика магнитного поля НМС5883L и модуля спутникового позиционирования на основе сигналов ГНСС NEO-7M и микроконтроллер ATMEGA128.

2. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение реализации цифрового фильтра Калмана, интервального и регрессионного подходов для фильтрации зашумленных показаний корабельного цифрового компаса. Результаты расчетов и практических испытаний ЦМКС показывают, что применение указанных математических методов позволяет снизить погрешность

определения азимута до значений сопоставимых с погрешностью показаний стандартных морских гирокомпасов.

3. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для работы устройств входящих в состав ЦМКС и обеспечивающих выполнение требований морского регламента. В структуре ЦМК имеются все компоненты, отвечающие стандартам компаса: блок датчика (датчик НМС5883L и модуль NEO-7M), блок-центр обработки, блок питания, блок передачи данных NMEA0183. Электрическая схема ЦМК, спроектированная по соответствующим стандартам, обеспечивает возможность длительной эксплуатации системы на море. Цифровое устройство отображения ЦМКС изготовлено из основных компонентов, таких как микроконтроллер ATMEGA16, восемь сегментных светодиодов, предназначенных для отображения азимута и скорости вращения судов, микросхема MAX485 для приема сигналов NMEA0183 от ЦМК. Изготовленное цифровое устройство отображения отличается надежностью, устойчивостью работы, удобством установки и наблюдения. Репитер гирокомпаса изготовлен из основных компонентов, таких как микроконтроллер ATMEGA8, шаговый двигатель, вращающаяся игла и т. д. Информация поступает в формате NMEA 0183 по каналу связи RS-485. Изготовленный репитер гирокомпаса характеризуется достаточно простой структурой, высокой надежностью и стойкостью от воздействия морских погодных условий.

4. Результаты испытаний ЦМКС, проведенных на вьетнамских судах, показывают, что при совместном использовании датчика магнитного поля и датчика позиционирования на основе ГНСС в сочетании с разработанными методами цифровой фильтрации помех, возникающих в условиях эксплуатации, точность выходных показаний ЦМКС значительно повышается и становится сопоставимой с погрешностью морских гирокомпасов судов в пределах 0.1-1.1 градуса. По материалам работы подана заявка на патент РФ на изобретение № 008665 от 06.02.2020г.

5. Перспективы развития результатов диссертационной работы заключаются в поисках новых решений по снижению шума с целью дальнейшего повышения точности разработанного ЦМК и возможности его применения на более крупных морских судах; а также разработка технических решений по передаче данных от ЦМКС до ГНСС для обеспечения функций удаленного управления и мониторинга параметров движения морских судов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определённых ВАК и Аттестационным советом УрФУ:

1. **Vu Xuan Hau.** Miniature band-pass filter on microstrip resonators / **Vu Xuan Hau**, Denis A. Letavin, Hung Luu Quang // 2017 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO). – 2017. – IEEE Xplore. – 2 p. (0,12 п.л./0,08 п.л.) (Scopus).

2. **Vu Xuan Hau.** Results of the Development and Experimental Studies of the Digital Magnetic Compass System / **Vu Xuan Hau**, V. E. Ivanov // Ural Sym-

posium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT 2018). – 2018. – IEEE Xplore. – PP. 359–362. (0,3 п.л./0,25 п.л.) (Scopus).

3. **Vu Xuan Hau**. Research, Design, Manufacture and Quality Improvement of a Digital Magnetic Compass System for Marine Vessels / **Vu Xuan Hau**, V. E. Ivanov // Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT 2020). – 2020. – IEEE Xplore. – PP. 313–317. (0,45 п.л./0,4 п.л.) (Scopus).

4. **Ву Суан Хау**. Применение калмановского фильтра и метода интервальных оценок для обработки зашумленной выходной информации цифровой магнитной компасной системы / **Ву Суан Хау**, В. Э. Иванов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». – 2020. – № 7. – С. 44–57. (0,7 п.л./0,6 п.л.).

Другие публикации:

5. **Vu Xuan Hau**. Researching, Designing and manufacturing the digital compass system for Fishing and Inland Vessels in Vietnam / **Vu Xuan Hau**, Nguyen Dinh Thach, Pham Ky Quang, Nguyen Xuan Phuong // Journal of Maritime Science and Technology. Vietnam Maritime University. ISSN 1859-316X. – 2016. – № 45. – PP. 60–64 (0,3 п.л./0,2 п.л.).

6. **Ву Суан Хау**. Фильтрация зашумленной информации корабельного цифрового магнитного компаса. Интервальный и регрессионный подход / **Ву Суан Хау**, С.И. Кумков // Современные проблемы математики и её приложений: Тезисы Международной (49-й Всероссийской) молодежной школы-конференции, тез. докл. – 4–10 февраля 2018. – С. 69 (0,1 п.л. / 0,07 п.л.).

7. **Ву Суан Хау**. Применение методов интервального анализа к цифровой обработке данных корабельного компаса / **Ву Суан Хау**, С.И. Кумков // Уральский радиотехнический журнал. – 2018. – № 4. – С. 7–19 (0,5 п.л./0,4 п.л.).

8. **Ву Суан Хау**. Исследование, изготовление корабельного цифрового магнитного компаса и применение фильтра Калмана для фильтрации зашумленной информации данного компаса / **Ву Суан Хау**, В. Э. Иванов, С. И. Кумков, Нгуен Динь Тхач // Радиоэлектроники (электронный журнал). URL: <http://jre.cplire.ru/jre/may19/6/text.pdf>. – 2019. – № 5. – 16 с. (0,7 п.л./0,6 п.л.).

9. **Vu Xuan Hau**. Using signals from GLONASS/GPS navigation systems to correct the readings of a digital magnetic compass / **Vu Xuan Hau**, V. E. Ivanov, Nguyen Dinh Thach // CriMiCo'2019. ITM Web of Conferences 30. 03006. – 2019. – 8 p. (0,36 п.л./0,26 п.л.).

10. **Vu Xuan Hau**. Designing the maritime digital compass repeater hardware and its controlling algorithm / **Vu Xuan Hau**, V. E. Ivanov // T-Comm: Телекоммуникации и Транспорт. – 2020. Т. 14. – № 7. – С. 51–56. (0,54 п.л./0,5 п.л.).