

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

Институт радиоэлектроники и информационных технологий

Кафедра радиоэлектроники и телекоммуникаций

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)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор,
Иванов Вячеслав Элизбарович
Научный консультант:
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Кумков Сергей Иванович

Екатеринбург – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО МАГНИТНОГО КОМПАСА ДЛЯ МАЛОТОННАЖНЫХ МОРСКИХ СУДОВ	10
1.1 Теория о магнитном поле Земли [9, 10].....	10
1.2 Типы магнитного компаса, используемого на кораблях	13
1.2.1 FURUNO PG –700	13
1.2.2 FURUNO PG–1000 [13]	14
1.2.3 Азимут–90м [14].....	15
1.3 Принципы работы навигационных систем GPS и ГЛОНАС. Показатели точности	16
1.3.1 Принцип работы ГНСС	20
1.3.2 Источники погрешностей спутниковых систем	25
1.3.3 Точность системы GPS/ ГЛОНАСС.....	27
1.4 Описание протокола NMEA–0183 [27–30].....	29
1.5 Выводы по главе 1.....	30
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ШУМА НА ПОКАЗАНИЯ ЦМКС И АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СОСТАВНЫХ УСТРОЙСТВ ЦМКС.....	32
2.1. Обоснование применения методов фильтрации Калмана и интервальных оценок для повышения точности показаний ЦМК.....	32
2.1.1 Теория фильтрации Калмана как метода устранения выходного шума ЦМК [78].....	32
2.1.2 Описание метода интервальной и регрессионной фильтрации [86]	35
2.2. Разработка и аппаратная реализация устройств входящих в состав ЦМКС	39
2.2.1 Разработка ЦМК.....	39
2.2.2 Разработка цифрового устройства отображения информации	52
2.2.3 Разработка репитера гирокомпаса.....	60
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТРОЙСТВ ЦМКС	72
3.1 Разработка ПО для ЦМК	72
3.1.1 Подпрограмма инициализации.....	74
3.1.2 Подпрограмма приема и обработки сигналов от датчика НМС5883L.....	75

3.1.3 Подпрограмма приема и обработки сигналов от модуля NEO–7М	76
3.1.4 Подпрограмма расчета значения азимута ψ на основе значений α и β .	81
3.1.5 Алгоритм Калмана для обработки зашумленного выходного сигнала ЦМК [78, 79, 81, 83, 84]	81
3.1.6 Алгоритм фильтрации с применением интервального подхода для микроконтроллера ATMEGA128 внутри ЦМК	84
3.2 Разработка ПО для цифрового устройства отображения	86
3.2.1 Алгоритм начальной инициализации программы	87
3.2.2 Алгоритм программы приема сигнала компаса	88
3.2.3 Алгоритм обработки сигналов компаса	89
3.2.4 Алгоритм отображения азимута на четырех 7–сегментных светодиодах	90
3.2.5 Алгоритм управления яркостью (диммер) светодиодных индикаторов..	91
3.2.6 Алгоритм расчета скорости поворота корабля	93
3.3 Разработка ПО для Репитера гирокомпаса.....	95
3.3.1 Подпрограмма инициализация и объявление переменных	96
3.3.2. Подпрограмма синхронизации	98
3.3.3 Подпрограмма прерывания INT1	98
3.3.4 Подпрограмма приема сигналов от ЦМК	99
3.3.5 Подпрограмма расчета азимута на основе данных NMEA0183, полученных из ЦМК.....	101
3.3.6 Алгоритм управления шаговым двигателем.....	102
3.4. Выводы по главе 3.....	103
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И ЭСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЦМКС	105
4.1 Результаты изготовления ЦМКС.....	105
4.2 Установка и подключение устройств ЦМКС.....	106
4.3 Тестирование ЦМК	108
4.3.1 Подготовка к тестированию и методы испытаний.....	108
4.3.2 Результаты испытания ЦМК.....	109
4.3.3 Результат фильтрации шумового сигнала для ЦМК на основе интервального подхода [86].....	115
4.4 Тестирование индикаторных устройств в составе системы.....	121
4.5. Выводы по Главе 4.....	122

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	124
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	127
Приложение 1. Программный код для устройств ЦМКС	134
Приложение 2. Программный код, написанный в ОП С#, для тестирования ЦМК	157
Приложение 3. Протокол испытаний ЦМКС	163
Приложение 4. Экспериментальные результаты испытаний ЦМКС	168

ВВЕДЕНИЕ

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 [1–5].

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 судов. Разрабатываемый ЦМК должен обеспечивать повышенную точность определения азимута курса корабля, сравнимую с точностью серийных гирокомпасов, соответствовать требованиям стандартов на морскую аппаратуру [6–8]. 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 международных цитатно-аналитических базах Scopus, 5 текстов докладов в материалах международных научно-практических конференций.

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, Уральский федеральный университет, 2018.

3. Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT 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 (USBEREIT), 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.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО МАГНИТНОГО КОМПАСА ДЛЯ МАЛОТОННАЖНЫХ МОРСКИХ СУДОВ

1.1 Теория о магнитном поле Земли [9, 10]

Рассмотрим некоторые сведения о геомагнетизме, которые потребуются в дальнейшем при разработке простых и компактных ЦМКС.

Магнитное поле Земли является диполем, ось которого составляет с осью вращения Земли угол $\sim 10^\circ$. Оно не проходит через геометрический центр вращения Земли, а сдвинуто на 342 км в сторону, противоположную восточной оконечности Бразилии. Полярность магнитного поля Земли противоположна географической полярности: Северный магнитный полюс расположен на юге, в Антарктиде, а Южный – на Севере, в Канаде. Так, Москва, расположенная на 56° северной географической широты, имеет южную магнитную широту 51° . Магнитный момент Земли $M = 8,1 \cdot 10^{25}$ Гс см³, а средняя напряженность магнитного поля на поверхности Земли составляет $\sim 0,4$ Гс [9].



Рисунок 1.1. Геомагнитное поле, стрелки – магнитные силовые линии
Основные определения элементов геомагнетизма [9].

– геомагнитные полюсы, это точки пересечения магнитной оси Земли с её поверхностью;

– геомагнитная широта, это угловое расстояние от геомагнитного экватора до рассматриваемой точки земной поверхности;

– магнитный полюс Земли, это точка на земной поверхности, в которой магнитная стрелка располагается вертикально. Различают Северный и Южный магнитные полюса Земли. Положение магнитных полюсов Земли со временем меняется;

– магнитный экватор, это геометрическое расположение точек на земной поверхности, в которых магнитная стрелка находится горизонтально относительно поверхности. Магнитный экватор не совпадает с географическим экватором.

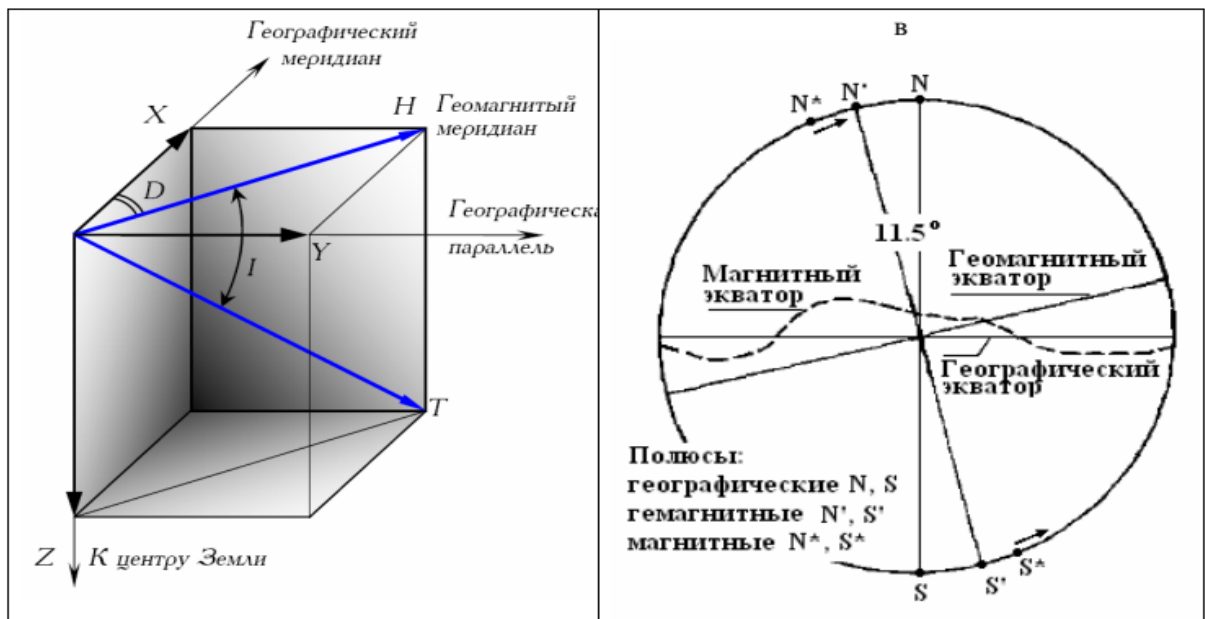


Рисунок 1.2. Составляющие магнитного поля

– магнитное склонение (D), это угол между географическим и магнитным меридианами в точке земной поверхности; магнитное склонение считается положительным, если северный конец магнитной стрелки отклонен к Востоку от географического меридиана, и отрицательным – если к Западу;

– магнитное наклонение (I), это угол между магнитной силовой линией и горизонтальной плоскостью. На магнитных полюсах Земли, а также в районах крупных магнитных аномалий магнитное наклонение равно 90° .

«Магнитное поле Земли в каждой точке пространства характеризуется вектором напряженности T , направление которого определяется тремя составляющими по осям X , Y и Z в прямоугольной системе координат (Рисунок 1.2). Также магнитное поле Земли можно описать горизонтальной составляющей

напряженности H , магнитным склонением D (углом между H и плоскостью географического меридиана) и магнитным наклоном I (углом между T и плоскостью горизонта)» [10].

Основной характеристикой магнитного поля является магнитная индукция B , представляющая собой векторную величину. «Направление вектора магнитной индукции совпадает с направлением силы, действующей на Северный полюс магнита, помещенного в данную точку магнитного поля» [10]. Величина B выражается единицей измерения тесла (Тл или (Н/А·м)). «Тесла является довольно крупной величиной магнитной индукции, поэтому для измерения слабых магнитных полей применяют мелкую дольную единицу – микротесла (мкТл). Стоит заметить, что полный вектор магнитного поля Земли составляет всего около 50 мкТл, но в документации на МЭМС– магнитометры обычно приводится другая единица измерения, характеризующая магнитное поле – гаусс (Гс)» [23]. Гаусс представляет собой единицу измерения магнитной индукции в системе СГС (сантиметр–грамм–секунда). При этом справедливы следующие равенства: $1 \text{ Гс} = 100 \text{ мкТл}$, $1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}$ [10].

Магнитная индукция связана с напряженностью магнитного поля соотношением:

$$B = \mu\mu_0 H \quad (1.1)$$

Здесь: μ – магнитная проницаемость среды, μ_0 – магнитная постоянная.

«Исходя из формулы (1.1), можно утверждать, что $B \sim H$. В итоге, на практике для определения направления вектора магнитного поля Земли измеряют две его составляющие по оси X и оси Y (Рисунок 1.3), а затем вычисляют угол φ на основании следующих формул» [10]:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{H_y}{H_x} = \frac{H \sin \varphi}{H \cos \varphi} \quad (1.2)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg} \varphi) \quad (1.3)$$

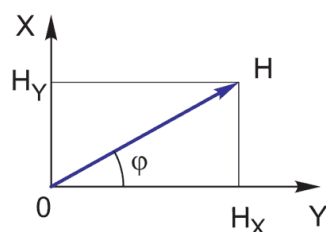


Рисунок 1.3. Разложение вектора магнитного поля Земли на составляющие

В настоящем исследовании для разработки ЦМК автором использован датчик НМС5883 [11], который имеет функцию приема сигналов H_x , H_y и связи с микроконтроллером по протоколу I2C.

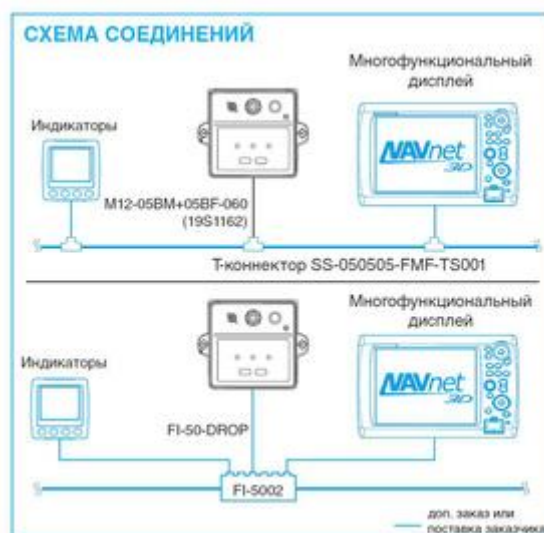
1.2 Типы магнитного компаса, используемого на кораблях

1.2.1 FURUNO PG –700

Это компас с совмещенным магнитным датчиком и скоростным гироскопом. Устройство использует для передачи данных шину CAN–bus. Модель стабильна и гарантирует высокий уровень точности. На корабле компас может быть установлен в любом удобном месте. Кроме того, компас можно подключить к бортовой сети и передавать информацию и сигналы по магистральному кабелю по протоколу NMEA0183 [12].



а)



б)

Рисунок 1.4. Магнитный компас FURUNO FG–700 (а) и схема его подключения (б)

Параметры магнитного компаса FURUNO FG–700 .

- индукционный магнитный датчик в сочетании с твердотельным датчиком угловой скорости;
- высокая точности $\pm 1,0^\circ$ и стабильность показаний;
- автоматическая коррекция искажений магнитного поля (первоначальная коррекция выполняется вручную);
- передача точных данных (и данных с повышенной точностью) о курсе корабля в приборы Furuno, подключаемые по шине CAN;
- скорость отслеживания $45^\circ/\text{с}$;
- имеется встроенный резистор–ограничитель, обеспечивающий безопасное включение прибора в сеть NMEA 2000.

1.2.2 FURUNO PG–1000 [13]

Это новый, недорогой электромагнитный компас. Основным элементом прибора – датчик, в состав которого входит трехосный магнитометр, кренометр и интегрированный вибрирующий гиросенсор. Компас PG–1000 учитывает особенности земного магнетизма, и вводит магнитное склонение в показания компаса. Измеренные данные курса корабля транслируются на основе протоколов NMEA0183 и FURUNO в различные навигационные устройства где требуются показания курса: радар, система автоматической радиолокационной прокладки, видеопрокладчики, гидролокаторы и т.д.

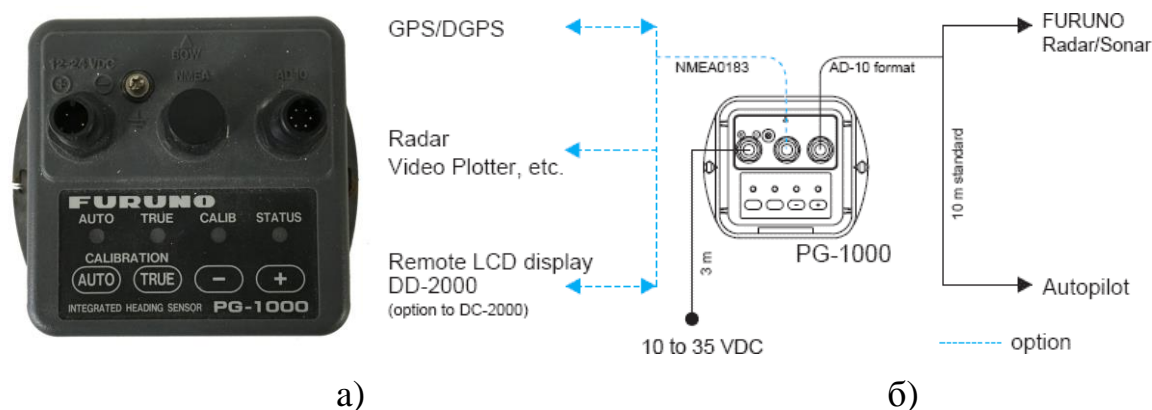


Рисунок 1.5. Магнитный компас FURUNO FG–1000 (а) и схема его подключения (б)

Технические характеристики FURUNO FG–1000 приведены в Таблице 1.1

Таблица 1.1. Технические характеристики FURUNO FG–1000

Точность	$\pm 1.5^\circ$ среднееквадратичное значение погрешности измерений
Компенсация	Автоматическая компенсация девиации от магнитного поля судна и креновой девиации
Угол наклона при качке	до $\pm 45^\circ$
Угловая скорость изменения курса	до $60^\circ/\text{сек. макс.}$
Скорость передачи данных	40 Герц
Интерфейс	Выход: формат NMEA 0183, HDG, HDT, HDM формат AD–10 Вход: формат NMEA 0183, RMC, VTG
Среда (IEC 60945 при испытаниях)	Температура: от -15°C до $+55^\circ\text{C}$ Влагозащищенность: IPX5 (IEC 60529), CFR–46 (USCG стандарт)
Источник питания	От 10 до 35 VDC, потребляемая мощность не более 3 Вт

1.2.3 Азимут–90м [14]

Компасы данного типа (Рисунок 1.6) предназначены для измерения и указания магнитного курса. Они имеют встроенный компенсатор девиации и устройство подсветки шкалы.



Рисунок 1.6 Магнитный компас Азимут – 90м

Устанавливаются на скоростные катера, корабли и суда на подводных крыльях и воздушной подушке.

Магнитный компас «Азимут 90М» крепится к подволоку или вертикальной переборке рубки судна, что снижает влияние ферромагнитных масс и электромагнитных полей, тем самым способствуя повышению точности

курсоуказания.

Особенности:

- наличие встроенного девиационного прибора;
- элементы прибора не требуют амортизации и специального охлаждения.

Технические характеристики магнитного компаса Азимут–90м приведены в Таблице 1.2.

Таблица 1.2. Технические характеристики магнитного компаса Азимут–90м

Диаметр катушки	90 мм
Цена деления шкалы	2 ⁰
Погрешность от трения	±(9/В1)
Бортовая сеть	=12/24 В
Потребляемая мощность, не более	5 Вт
Масса, не более	1,2 кг
Габаритные размеры	ø122x173 мм
Назначенный ресурс до среднего ремонта	60000 ч
Срок службы	15 лет

1.3 Принципы работы навигационных систем GPS и ГЛОНАС. Показатели точности



Рисунок 1.7. Структура ГНСС GPS/ГЛОНАСС

ГНСС позволяет определять географические координаты любого объекта, находящегося над поверхностью Земли в любое время суток и с высокой

точностью. Это достигается путем измерения расстояний от самого ГНСС–приемника до четырех спутников в космосе. ГНСС (Рисунок 1.7) является чрезвычайно сложной технической системой. Полная структура, состоит из трёх различных сегментов: космического сегмента, сегмента управления и сегмента пользователей [15,16].

«Космический сегмент. Космический сегмент GPS (Global Positioning System) состоит из 24 действующих спутников, вращающихся вокруг Земли по шести орбитам на высоте приблизительно 20200 км над земной поверхностью с наклоном в 55° к экватору. В каждой плоскости орбиты находится всегда от четырех до восьми спутников (рис.1.8.а)» [16].

В России (ранее СССР) была разработана своя система ГНСС под названием Глобальная Навигационная Спутниковая Система (ГЛОНАСС), содержащая 24 спутника (Рисунок 1.8.б). В отличие от системы GPS эти спутники, распределены только в трех орбитальных плоскостях с наклоном $i=64,8^\circ$. «Орбитальные плоскости находятся на высоте приблизительно 19100 км над поверхностью Земли, и различаются номинально на 120 градусов по абсолютной долготе восходящего узла. Номинальный период обращения спутника $T = 11 \text{ ч} . 15 \text{ м} . 44 \text{ с}$ [15–18]».

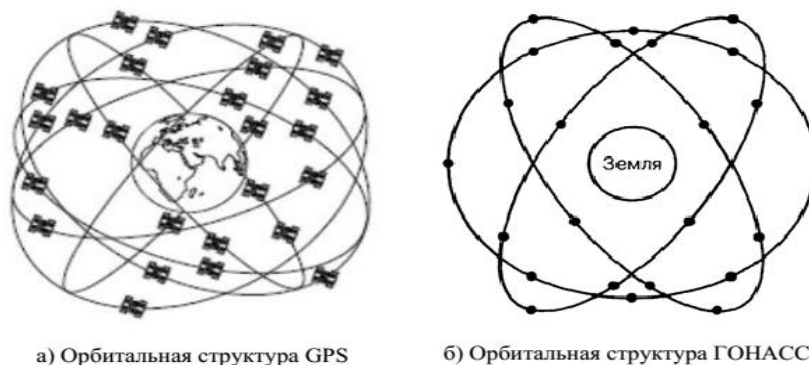


Рисунок 1.8. Орбитальные структуры ГНСС GPS (а) и ГЛОНАСС (б)

«Принцип работы системы ГЛОНАСС аналогичен американской системе навигации GPS. Основное отличие от системы GPS заключается в том, что орбитальная группировка космических аппаратов в системе ГЛОНАСС показывает большую стабильность, чем в системе GPS из-за отсутствия необходимости синхронизации с вращением Земли. Благодаря этому, она не

требует дополнительных корректировок во время эксплуатации на орбите. Кроме того, она обеспечивает большую точность определения координат в полярных районах, где GPS работает с существенно большей погрешностью» [16].

«Сигналы всех спутников системы GPS распространяются со скоростью света на двух несущих частотах, находящихся в L–диапазоне. Путем умножения основной частоты можно получать две несущие частоты L1 и L2 на частотах 1575,42 МГц и 1227,60 МГц, соответственно» [16].

«В Таблице 1.3 и на Рисунок 1.9 показано, что несущая частота L1 модулируется как общедоступным кодом C/A (Clear Access/Coarse Acquisition) с частотой 1,023 МГц, так и точным защищенным кодом P с частотой в 10,23 МГц, а несущая частота L2 модулируется только кодом P» [16].

«Таблица 1.3. Компоненты сигнала GPS» [16]

Назначение	Коэффициент	Частота (МГц)
Основная частота	f_0	10,23
Несущая L1	$f_1 = f_0 * 154$	1575,42
Несущая L2	$f_2 = f_0 * 120$	1227,60
P-код	f_0	10,23
C/A-код	$f_0 / 10$	1,023
навигационное	$f_0 / 204600$	$50 \cdot 10^{-6}$

Каждый спутник обладает своим индивидуальным кодом, по которому приёмнику удастся идентифицировать спутник, передающий радиосигналы. Потом эти коды применяются для измерения псевдодалейностей и последующего вычисления положения наблюдателя.

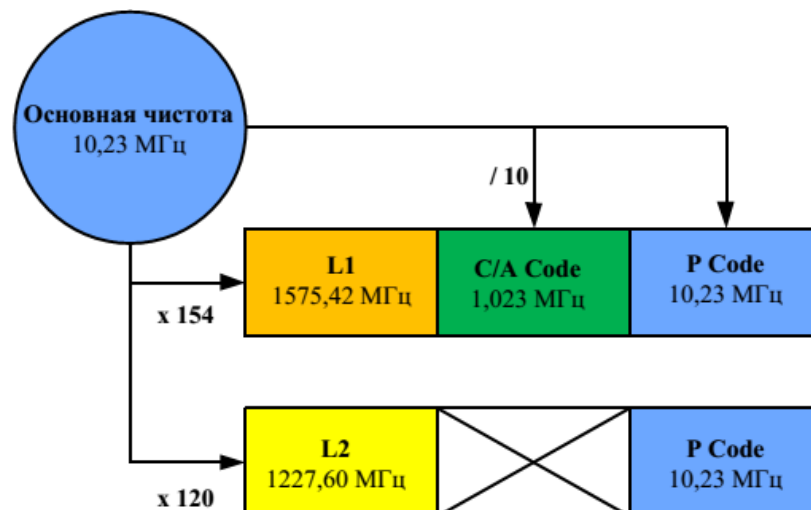


Рисунок 1.9. Структура спутникового сигнала GPS

Сегмент управления спутниковой системы GPS и ГЛОНАСС. «Сегмент управления GPS состоит из одной ведущей станции управления и пяти контрольных станций. Три контрольных станции оснащены передающими антеннами, транслирующими информацию спутникам, равномерно распределенными вокруг земного шара в экваториальных широтах» [16]. (рис.1.10).

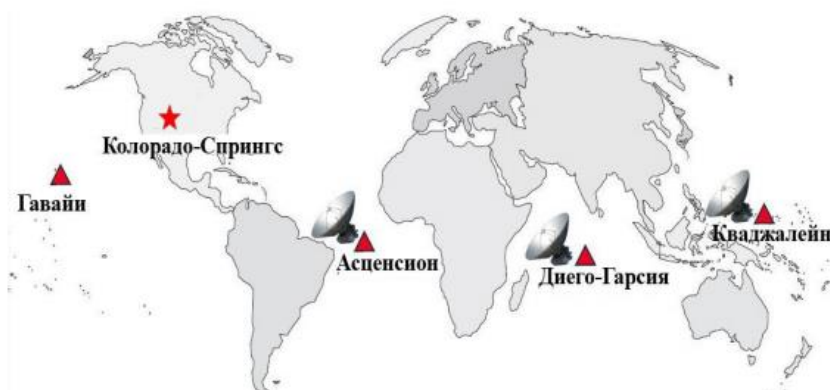


Рисунок 1.10. Расположение станций в спутниковой системе управления GPS

«Сегмент управления системы ГЛОНАСС содержит: центр управления, центральный синхронизатор, командную станцию слежения, контрольные станции, и вспомогательные системы» [16]. Принцип работы и задачи этого сегмента аналогичны сегменту управления GPS. Расположение станций сегмента управления ГЛОНАСС показано на рис.1.11 [19].



Рис.1.11. Расположение станций сегмента управления ГЛОНАСС

Сегмент пользователей. В пользовательский сегмент входит аппаратура потребителей. Она предназначена для приема сигналов от навигационных спутников, измерения навигационных параметров и обработки измерений. В этом исследовании автор использует модуль приемника ГНСС (NEO-7M), который интегрирован в ЦМК для повышения точности вывода для ЦМК.

1.3.1 Принцип работы ГНСС

«Принцип работы спутниковой навигации основан на определении расстояния от транспортного средства до спутников, координаты которых известны. Точные координаты спутников (X_0, Y_0, Z_0) в инерциальной системе координат определяются из данных эфемерид и альманаха, передаваемых в навигационных сообщениях» [20–23].

Эфемерида – это небесные координаты спутника, которые спутник передает каждые 30 секунд. За это время приемники успевают принять и обработать информацию. Эфемеридные данные обновляются каждые 4 часа.

«Альманах – это данные об орбитах всех спутников. Каждый спутник передает собственную эфемериду и альманах о положении всех спутников. Альманах содержит информацию о расположении спутников «на небе», что позволяет при очередном включении приемника навигатора значительно сузить секторы поиска навигационного сигнала и уменьшить время его «захвата». Эти данные обновляются примерно раз в 6 месяцев. Навигационное сообщение состоит из 1500 бит и содержит» [23] :

- дату и время;
- состояние спутника (рабочее или нет);
- эфемеридные данные (координаты спутника);
- альманах.

В спутниковых системах навигации используется дальномерный метод определения местоположения объекта. Суть этого метода заключается в следующем. «Предположим, что объект (транспортное средство) с неизвестными координатами (x_0, y_0, z_0) находится на поверхности Земли, и над ним располагается навигационный спутник с известными координатами (X_{01}, Y_{01}, Z_{01})» [23].

В момент времени t_0 спутник излучает радиосигнал. Предполагается, что фронт радиоволны имеет сферическую форму. «Через время t_1 фронт радиоволны достигнет объекта на Земле, причем его координаты будут находиться на поверхности сферы с радиусом R_1 , равным расстоянию от спутника до потребителя, и центром в точке с координатами (X_{01}, Y_{01}, Z_{01}) , измеренными в инерциальной системе координат (Рисунок 1.12)» [23].

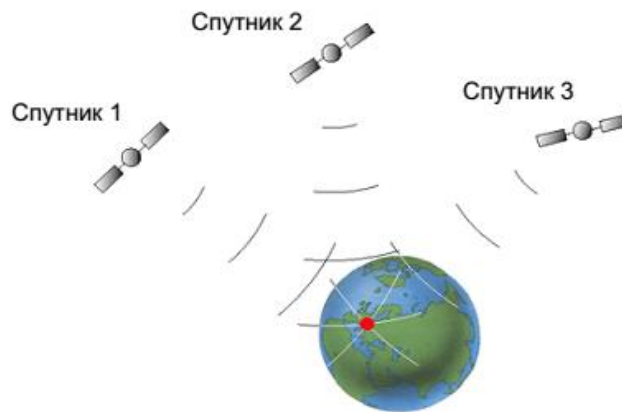


Рисунок 1.12. Спутники необходимые для определения позиции в трехмерном пространстве

Математически это можно описать с помощью уравнения сферы:

$$R_1^2 = (X_{01} - x_0)^2 + (Y_{01} - y_0)^2 + (Z_{01} - z_0)^2 = c^2 t_1^2, \quad (1.4)$$

где c — скорость прохождения радиосигнала. Радиоволны распространяются со скоростью света (299 792 458 м/с).

Для определения неизвестных координат объекта одного уравнения недостаточно (так как в уравнении имеется три неизвестных). Поэтому необходимо получить информацию, по меньшей мере, еще от двух спутников. Тогда получим систему из трех уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{aligned} R_1^2 &= (X_{01} - x_0)^2 + (Y_{01} - y_0)^2 + (Z_{01} - z_0)^2 = c^2 t_1^2; \\ R_2^2 &= (X_{02} - x_0)^2 + (Y_{02} - y_0)^2 + (Z_{02} - z_0)^2 = c^2 t_2^2; \\ R_3^2 &= (X_{03} - x_0)^2 + (Y_{03} - y_0)^2 + (Z_{03} - z_0)^2 = c^2 t_3^2, \end{aligned} \quad (1.5)$$

где x_0, y_0, z_0 — координаты объекта (транспортного средства); X_0, Y_0, Z_0 — координаты соответствующих спутников; t_1, t_2, t_3 — время прохождения радиосигнала от спутников до транспортного средства (ТС); c — скорость света.

Для решения системы уравнений (1.5) находятся координаты x_0 , y_0 , z_0 объекта в инерциальной системе координат. Искомые координаты являются координатами точки пересечения трех сфер (Рисунок 1.12).

«Таким образом, задача навигационного приемника сводится к определению расстояния R до каждого спутника на основании данных об их координатах, и решению системы уравнений (1.5) для определения координат x_0 , y_0 , z_0 объекта или транспортного средства» [23].

Поясним, как в приемнике навигатора определяется расстояние до спутников. Для этого необходимо *измерить время t* прохождения радиосигнала от спутника до приемника и вычислить расстояние по формуле:

$$R = t \cdot c. \quad (1.6)$$

«Другими словами, зная время, за которое сигнал дошел от спутника до ГЛОНАСС/*GPS*–приемника, и умножив его на скорость света, можно определить расстояние до этого спутника» [23].

Время t определяется следующим образом. «На спутнике и в приемнике навигатора на Земле, *одновременно* генерируется сложная кодовая посылка (дальномерный код), повторяющаяся с частотой 1 кГц» [23]. Эта кодовая комбинация называется псевдослучайным кодом *PRN* (*Pseudo Random Number code*). Каждому спутнику соответствует своя уникальная последовательность кода *PRN*. По этой последовательности в приемнике пользователя определяется, от какого спутника пришел сигнал. При этом в системе спутниковой навигации используется метод множественного доступа с кодовым разделением абонентов (CDMA) [24].

Несущие частоты, на которых работают спутники, модулируются *PRN*–кодом и навигационным сообщением. В Системе Навигационных Сообщений (СНС) используется фазовая манипуляция несущей частоты [24].

«Для определения времени прохождения радиосигнала от спутника до приемника, на спутнике и в приемнике навигатора *одновременно* формируются *одинаковые PRN*–коды» [23]. Принятый со спутника код сравнивается со сформированным кодом приемника, и определяется временная

задержка одного кода по отношению к другому (Рисунок 1.13).

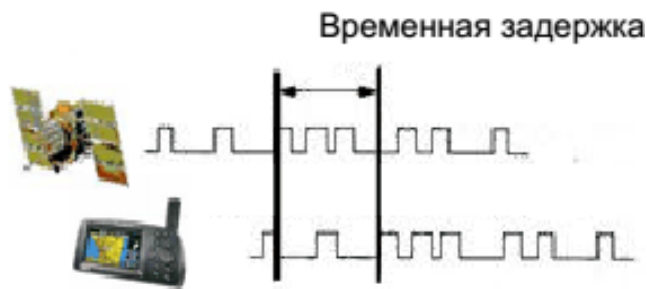


Рисунок 1.13. Определение временной задержки

Этот временной сдвиг и будет соответствовать времени прохождения сигнала от спутника до приемника. Однако следует заметить, что все сказанное справедливо, только если часы на спутнике и в приемнике строго синхронизированы. «Так, при расхождении во времени, которое составит всего 0,01 секунды, ошибка в определении расстояния составит 3000 км, что приведет к ошибке позиционирования» [23].

«На спутниках установлены атомные часы, имеющие очень высокую точность, а в обычных навигационных приемниках используются недорогие кварцевые часы, обладающие существенно меньшей точности» [23]. «Для исключения рассогласования показаний часов спутника и приемника, при решении навигационной задачи используются данные еще одного спутника. Это поясняется рис. 1.14, где показано определение местоположения объекта на плоскости (определение двух координат) с помощью трех спутников в двух случаях: при показаниях точных часов (пунктирная линия) и показаниях часов приемника, которые спешат на 0,5 секунды (сплошная линия)» [23].

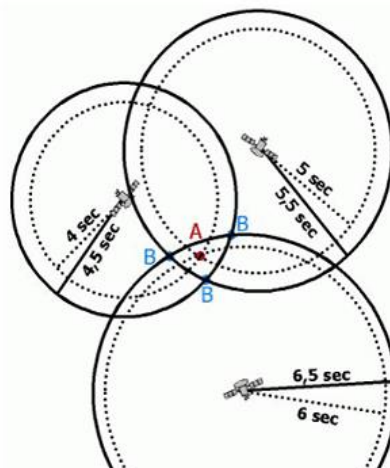


Рисунок 1.14. Определение местоположения объекта с помощью 3–х спутников

«В первом случае все окружности пересекаются (точка А), следовательно, есть решение системы уравнений (1.5) и координаты объекта могут быть вычислены» [23]. Во втором случае нет общей точки пересечения окружностей, а следовательно, местоположение объекта не определено. Тогда контроллер навигационного приемника определяет, что часы идут неточно и начинает прибавлять или уменьшать время во всех измерениях до тех пор, пока не найдется единое решение системы уравнений.

«Таким образом, для получения информации о двух координатах транспортного средства необходимо как минимум три спутника, а для определения трех координат – четыре» [23]. Таким образом, навигационный приемник выполняет следующие функции:

- принимает и запоминает эфемеридные данные спутников;
- определяет временную задержку t дальномерного кода;
- рассчитывает расстояния R до спутников по формуле (1.6);
- решает систему уравнений (1.5) и определяет координаты объекта (x_0, y_0, z_0) в инерциальной системе координат;
- переводит координаты объекта из инерциальной системы в соответствующую неинерциальную систему координат;
- пересчитывает эти координаты в географические, и находит долготу, широту и высоту объекта над уровнем моря.

Для увеличения точности позиционирования в навигационном приемнике обрабатываются сигналы от дополнительных спутников.

Конструктивно приемники делятся на одноканальные и многоканальные. Одноканальные – самые простые и дешевые. В них информация от всех спутников обрабатывается последовательно, что требует достаточно большого количества времени. Недостатками таких навигаторов является: низкая точность, невозможность измерения скорости, отсутствие информации на время расчетов.

«В многоканальных приемниках (с 4, 8, 12 и 16 каналами) одновременно

ведется обработка сигналов всех спутников, находящихся в пределах видимости, что увеличивает точность позиционирования. Многие приемники могут быть настроены на работу как с ГЛОНАСС, так и с GPS» [23].

Описание и технические характеристики отечественного навигационного приемника МНП–М7 приведены в [25].

1.3.2 Источники погрешностей спутниковых систем

«В реальных условиях на точность определения координат потребителя существенное влияние оказывают множество факторов (Рисунок 1.15), воздействующих на результаты измерений псевдодальностей» [16].

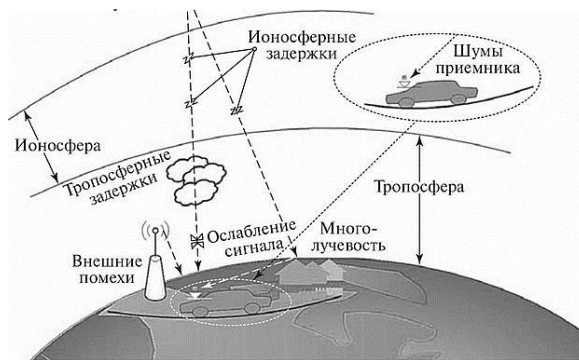


Рисунок 1.15. Источники погрешностей спутниковой системы

«Под воздействием космического излучения (прежде всего солнечного) в слое ионосферы образуются свободные электроны и ионы, уменьшающие скорость распространения радиоволн при прохождении через нее. Эффект выглядит подобно преломлению луча света, который проходит через стекло (Рисунок 1.16)» [16]. Замедление зависит от концентрации электронов. Основной проблемой при компенсации ионосферной задержки является тот факт, что её значение сильно зависит от географического положения, температуры, давления, влажности воздуха, солнечной и геомагнитной активности и, особенно, от времени суток и года. «Например, ночью влияние ионосферы весьма низкое, время запаздывания может составлять всего 10 нс (что равносильно погрешности в 3м)» [16]. Днем Солнце увеличивает воздействие ионосферы и замедляет сигнал, в данном случае время запаздывания может достигать 50 нс.

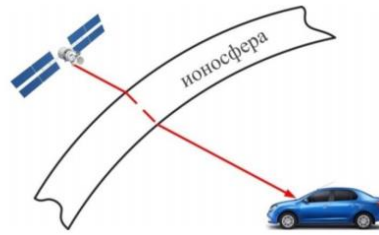


Рисунок 1.16. Ионосферные задержки

«Значение задержки сигналов спутников, находящихся низко над горизонтом, может возрасти многократно по сравнению со случаем, когда спутник находится в зените, из-за увеличения расстояния прохождения сигнала через атмосферу (Рисунок 1.17). Для спутников, расположенных в зените, тропосферная задержка сигнала может составлять 7 нс (погрешность до 2м), и до 83 нс (погрешность до 25м) для спутников, находящихся под углом к горизонту меньше 5° » [16].

«Ионосферные задержки необходимо учитывать, если требуется достичь точности определения координат менее 8 м. Определение и учет значения ионосферной задержки может осуществляться несколькими методами: методом моделирования трассы, методом двухчастотных измерений и методом избыточных одночастотных измерений» [16].

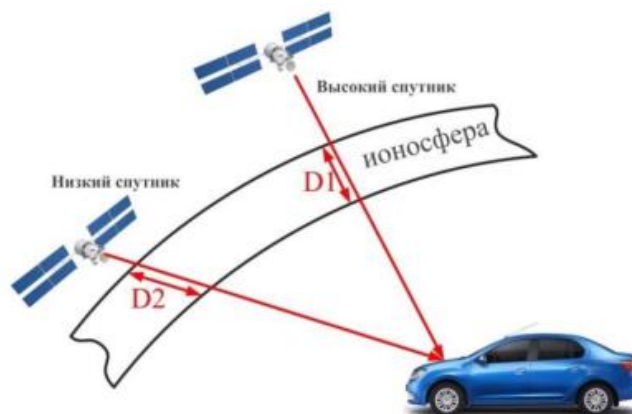


Рисунок 1.17. Влияние расположения спутника на величину задержки сигналов спутников

В реальных условиях на вход антенны приемника кроме радиосигналов со спутника, поступают радиоволны переотраженные от местных предметов (зданий, земной и водной поверхности, деревьев и т.п.). Это явление называется многолучевостью. На рис. 1.18 изображено явление переотражения радиосигнала

в городских условиях.

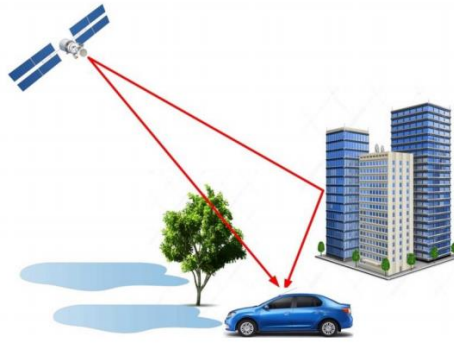


Рисунок 1.18. Явление переотражения радиосигнала

В городских условиях в окружении высотных зданий, величина погрешности может достигать 50 м и более. «Для снижения погрешности можно поднять антенну приемника на максимально возможную высоту или использовать сигналы высокой точности с помощью специальных GPS антенн, со встроенным защитным экраном для предотвращения приёма отраженных сигналов (рис. 1.19)» [16].



Рисунок 1.19. Антенна Choke–Ring (кольцевой дроссель)

1.3.3 Точность системы GPS/ ГЛОНАСС

«Суммарное значение погрешности GPS/ГЛОНАСС получается в результате суммирования всех погрешностей от различных источников, рассмотренных выше. Типовая погрешность гражданской приемной аппаратуры составляет приблизительно 1,5–10 м для системы GPS, и 5–15 м для системы ГЛОНАСС » [16].

«Как правило, погрешность возникает в результате расхождения между фактическим положением навигационного спутника и его расчетным положением, и не превышает 3 м для системы GPS и 5,3 м для системы ГЛОНАСС» [16]. В Таблице 1.4 приведены типичные источники погрешностей и

их величины.

Таблица 1.4. Общий состав погрешностей определения псевдодальности [26]

Источник погрешности	GPS	ГЛОНАСС
Ошибки эфемеридного обеспечения	2,5	2,6
Нестабильность часов спутника	2	2
Влияние ионосферы	5	4
Влияние тропосферы	0,5	0,5
Многолучевость	1	2,5
Ошибки, связанные с приемником	1	1,5
Прочие	2	2

В зависимости от метода измерения, точность определения координат наблюдателя с использованием системы GPS/ГЛОНАСС может достигать значений от 100 м до единиц миллиметров. «По используемому наземному оборудованию эти методы могут быть разделены на три основных класса» [16]:

– «Первый класс: дифференциальное координирование (DGPS – Differential GPS). В этом режиме используются два приемника: один на опорной станции с определенными координатами, и другой (приемник пользователя) на местности. По радиоканалу корректирующие поправки от опорной станции передаются приемнику, где выполняется коррекция координаты. Благодаря этому точность определения координат может достигать 0,5–5 м» [16].

– «Второй класс: автономная навигация, в которой используется единственный приёмник (карманный GPS приёмник) для мгновенного получения координат и высоты. В этом случае точность определения координат может быть хуже 100 м для гражданских потребителей и приблизительно 20 м для военных потребителей» [16].

– «Третий класс: здесь дифференциальные фазовые измерения используются для определения координат объектов с высокой точностью (около 0,5–20 мм. Эти методы обычно применяются при решении задач навигации или геодезических работах)» [16].

Использование DGPS (Differential GPS) позволяет достичь точности определения псевдодальности порядка десяти метров. «Данная погрешность не зависит от типа приемника и искусственных искажений сигналов (Selective

Availability), а зависит только от расстояния между опорной станцией и приемником пользователя» [16]. В Таблице 1.5 приведены характеристики точности дифференциального режима.

Таблица 1.5. Интегральные погрешности определения псевдодальности при использовании дифференциального режима [26]

Источник погрешности	GPS без-дифференциального режима (м)	Дифференциальный режим GPS (м)	Дифференциальный режим ГЛОНАСС (м)
Ошибки эфемериды	5-20	0-1	0
Погрешность часов спутника	3	0	0,7
Ионосферные погрешности	15-20	2-3	0,5
Тропосферы погрешности	3-4	1	0,5
Многолучевость	2	2	1,4
Шумы в приемнике	2	2	0,6

1.4 Описание протокола NMEA–0183 [27–30]

«Национальная Ассоциация Морской Электроники (National Marine Electronics Association – NMEA) разработала специальный протокол для поддержания совместимости морского навигационного оборудования различных производителей. Протокол NMEA описывает не только данные, полученные с GPS приемников, но и измерения сонаров, радаров, электронных компасов, барометров и других навигационных устройств, применяемых на морских судах» [27–30].

NMEA — это формат передачи сообщений между корабельными приборами. Он включает в себя систему сообщений для обмена информацией между навигационными GPS–приемниками и потребителями навигационной информации. Все команды и сообщения передаются в текстовом ASCII–виде. Сообщения относящиеся к GPS–приемнику начинаются с \$GP, в конце строки сообщения должны быть символы. В последнем поле сообщения может быть указана контрольная сумма текущего сообщения, начинающаяся с разделителя *. Контрольная сумма соответствует всем символам сообщения (включая пробелы), расположенных между разделителями \$ и *, не включая последних.

Шестнадцатеричный результат переводится в два ASCII–символа (0–9, A–F) [30].

Общие положения [31]:

- Протокол обмена асинхронный, 8 бит данных, 1 стоповый бит, без контроля четности, управление потоком данных не используется. Рекомендованная стандартом скорость обмена 4800 бод .

- Стандартные сообщения состоят из заголовка, определяющего тип сообщения, и информационных полей данных. Сообщения начинаются символом «\$» и заканчиваются символом «*», за которым последовательно идут две шестнадцатеричные цифры контрольной суммы «hh», символы возврата каретки и перевода строки . В качестве разделителя полей данных используется символ «,».

1.5 Выводы по главе 1

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

Рассмотрены основы теории магнитного поля Земли. Изучены параметры магнитного поля Земли, дается 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 на рынке.

«Рассмотрены принципы работы и структура американской глобальной навигационной спутниковой системы (GPS) и российской (ГЛОНАСС)» [16]. «Приведены уравнения для определения местоположения любого объекта, находящегося на поверхности Земли в любое время с высокой точностью и достаточной надежностью путем решения навигационной задачи с помощью системы основных уравнений ГНСС на основе обработки информации о координатах модуля сбора сигналов ГНСС» [16] . Разработки метода определения азимута судна представлен в следующих главах. «Дана оценка влияния множества факторов на точность определения координат потребителя. Значение погрешности GPS/ГЛОНАСС определяется 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» [16]

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

Показано, что при параллельном использовании датчика магнитного поля и датчика позиционирования на основе ГНСС в сочетании с методами фильтрации выходного шума, точность ЦМКС значительно повышается. Устройства в составе ЦМКС полностью соответствуют качественным критериям: допустимая погрешность измерений азимута, удачный дизайн, устойчивая работа в морских условиях, невысокая стоимость ЦМКС обеспечивает коммерческую привлекательность проекта.

Процесс разработки аппаратного обеспечения для устройств ЦМКС и теория методов фильтрации выходной информации ЦМК представлены в следующей главе.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ШУМА НА ПОКАЗАНИЯ ЦМКС И АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СОСТАВНЫХ УСТРОЙСТВ ЦМКС

2.1. Обоснование применения методов фильтрации Калмана и интервальных оценок для повышения точности показаний ЦМК

Как показывает практический опыт, выходной сигнал компаса всегда содержит значительную неопределенность – шум, связанный с искажениями магнитного поля Земли. В следствии этого выходное показание азимута компаса колеблется около некоторого истинного значения. В настоящее время разработаны различные методы фильтрации зашумленного выходного сигнала. В рамках настоящего исследования для повышения точности показаний ЦМК было предложено использовать методы фильтрации Кальмана и интервальных оценок.

2.1.1 Теория фильтрации Калмана как метода устранения выходного шума ЦМК [78]

Фильтр Калмана использует динамическую модель системы (физический закон движения), известные управляющие воздействия и множество последовательных измерений для формирования оптимальной оценки состояния. «Алгоритм состоит из двух повторяющихся фаз: предсказание и корректировка. На первом этапе рассчитывается предсказание состояния в следующий момент времени (с учетом погрешности их измерения). На втором этапе, новая информация с датчика корректирует предсказанное значение (также с учетом погрешности и зашумленности этой информации)» [32–35].

Общая структура алгоритма фильтрации Калмана показана на рис. 2.1. Уравнения описывающие процедуру фильтрации представлены в матричной форме. В случае обработки одной переменной величины, матрицы вырождаются в скалярные величины.

Подстрочный индекс обозначает момент времени: k — текущий, $(k-1)$ — предыдущий. Подробное описание структуры фильтра и описание его переменных представлены на рис. 2.2. Как показано на рис. 2.1, фильтрация

циклически выполняется в два шага :



Рисунок 2.1. Иллюстрация операций фильтра Калмана

Предсказание. Предсказание \hat{x}_k^- состояния системы в текущий момент времени. Это значение рассчитывается на основе предыдущего отфильтрованного значения \hat{x}_{k-1} и параметров фильтра F , B , u_{k-1} по формуле

$$\hat{x}_k^- = F\hat{x}_{k-1}^- + Bu_{k-1}. \quad (2.1)$$

На первом шаге вычисляется также предсказание ошибки P_k^- . Ее расчет выполняется на оценке P_{k-1} ошибки в предыдущий момент времени с помощью матриц F , Q по формуле

$$P_k^- = FP_{k-1}^-F^T + Q. \quad (2.2)$$

Корректировка. На этом шаге первой задачей является вычисление коэффициента усиления K_k . Расчет выполняется по предсказанному значению P_k^- и параметрам фильтра H , R по формуле

$$K_k = P_k^-H^T(HP_k^-H^T + R)^{-1}. \quad (2.3)$$

При этом выходное значение отфильтрованного сигнала обновляется по формуле

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-), \quad (2.4)$$

где z_k – измеренное значение; \hat{x}_k^- – предсказанное значение сигнала.

Далее производится обновление оценки ошибки. Расчет производится по

формуле

$$P_k = (I - K_k H) P_k^-, \quad (2.5)$$

где P_k^- — предсказанное значение ошибки; K_k и H — параметры фильтра.

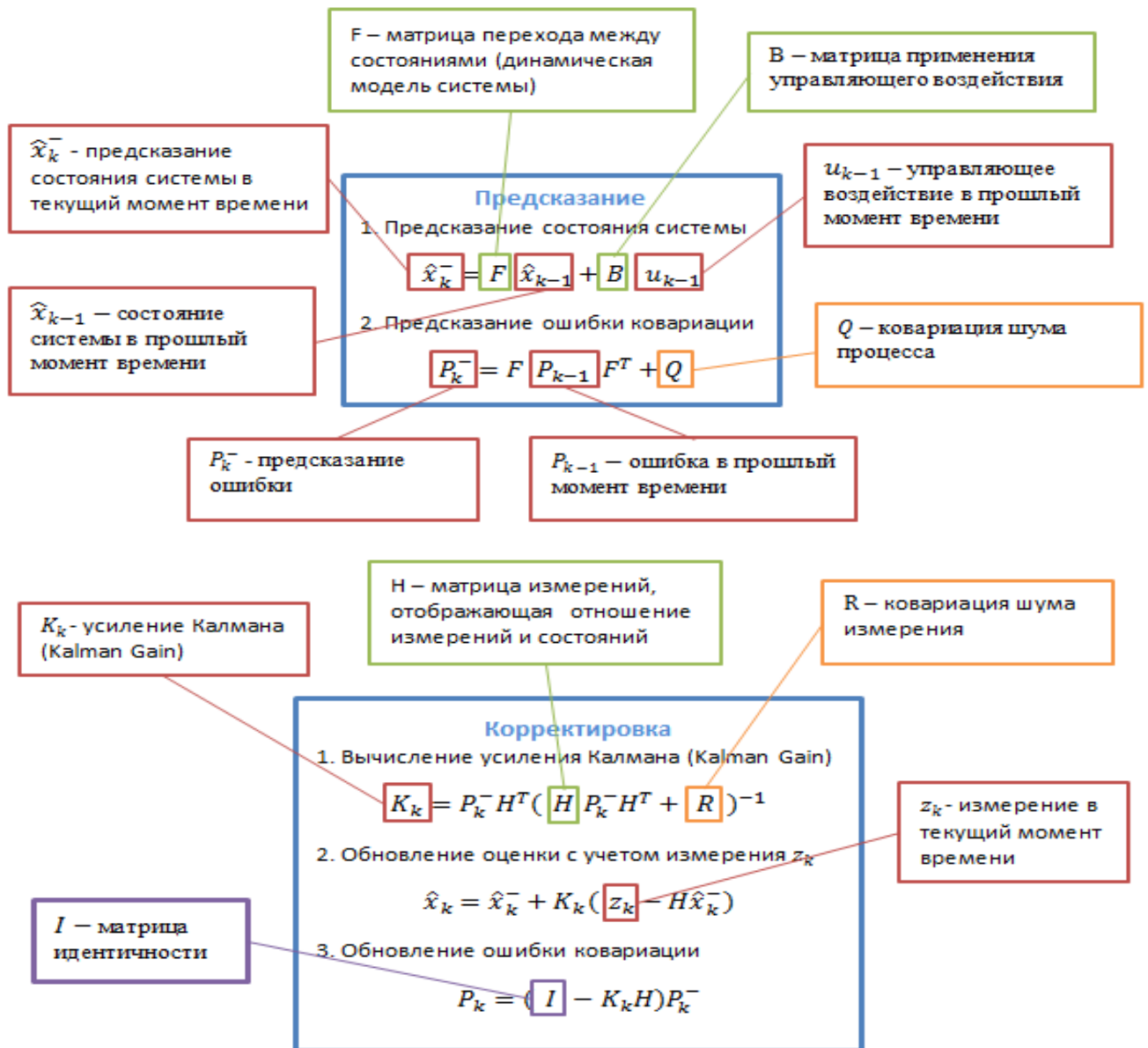


Рисунок 2.2. Смысл параметров в формулах фильтра Калмана

Таким образом, алгоритм фильтра Калмана описывается формулами (2.1) – (2.5). Для реализации фильтра необходимо задать параметры F , B , Q , H , R . В рассматриваемом случае ЦМК имеется только один вход (измеренный зашумленный азимутальный сигнал) и один выход (результат фильтрации). Поэтому данные параметры могут быть выбраны и рассчитаны достаточно просто.

2.1.2 Описание метода интервальной и регрессионной фильтрации [86]

А. Особенности изменения азимута корабля

По результатам работы ЦМК на заданном интервале $[0, T]$ наблюдения, в моменты t_n измерений получена выборка N значений ψ_n азимута корабля

$$\{t_n, \psi_n\}, t_n \in [0, T], n = 1, N. \quad (2.6)$$

При аддитивной модели зашумления, каждое полученное измерение ψ_n имеет следующую структуру:

$$\psi_n = \Psi_n + e_n, n = 1, N, |e_n| \leq e_{\max}, \quad (2.7)$$

где Ψ_n – неизвестная измеряемая истинная величина азимута корабля; e_n – погрешность n -го измерения, ограниченная по модулю величиной e_{\max} .

Вероятностные характеристики погрешности измерения *неизвестны*, а погрешности в соседних измерениях независимы между собой.

Для каждого измерения азимута корабля ψ_n в соответствии с моделью зашумления (3.21) рассчитывается интервал неопределённости H_n с нижней ${}_{-}\psi_n$ и верхней ${}^{+}\psi_n$ границами

$$H_n = [{}_{-}\psi_n, {}^{+}\psi_n], n = 1, N: {}_{-}\psi_n = \psi_n - e_{\max}, {}^{+}\psi_n = \psi_n + e_{\max}. \quad (2.8)$$

Напомним, что физический смысл интервала неопределённости (2.8) – это область возможных значений сигнала, содержащая неизвестную истинную измеряемую величину.

В случае постоянного азимута корабля, функция, описывающая процесс изменения измеряемого магнитного компонента от времени t , является константой на всем интервале наблюдения

$$\Psi_1(t) = \text{Const}, t \in [0, T], \quad (2.9)$$

а в случае разворота судна с постоянной угловой скоростью, изменение его азимута корабля описывается линейной функцией $\Psi_2(t)$

$$\Psi_2(t) = \Psi_n + \omega t, t \in [0, T], \quad (2.10)$$

где T – момент окончания наблюдения (2.6); Ψ_n – начальное значение аппроксимирующей функции на момент $t = 0$; ω – угловая скорость изменения азимута, считается постоянной на рассматриваемом интервале времени

наблюдения. Здесь величины Ψ_n и ω являются параметрами, подлежащими определению (оцениванию).

Формулировка задачи: Для заданной выборки замеров (2.6), при модели зашумления (2.7) и соответствующей описывающей функции (2.9) или (2.10) требуется найти текущую величину азимута и оценку её точности.

Б. Основные математические соотношения фильтрации информации

Обработка стандартным методом наименьших квадратов

Поскольку вероятностные характеристики погрешности измерений неизвестны, стандартные статистические методы (например, [36]) можно применять только формально.

Для случая постоянства азимута при описывающей функции (2.9) используются простые стандартные соотношения. Выходная оценка на момент T окончания наблюдения рассчитывается как математическое ожидание выборки

$$\psi_T = (\sum_{n=1, N} \psi_n) / N. \quad (2.11)$$

Оценка среднеквадратического значения σ_T рассеяния выходной величины находится как

$$\sigma_T = \text{Sqrt}(\sum_{n=1, N} (\psi_n - \psi_T)^2 / (N-1)). \quad (2.12)$$

Для случая переменного азимута с описывающей функцией (2.10), стандартным методом наименьших квадратов [36] рассчитываются значения её параметров и СКО

$$\Psi_{H, \text{МНК}}, \omega_{\text{МНК}}, \sigma_{\text{МНК}}, \quad (2.13)$$

и определяются возможные безусловные интервалы начального значения и угловой скорости

$$[-\Psi_{H, \text{МНК}}, +\Psi_{H, \text{МНК}}], [-\omega_{\text{МНК}}, +\omega_{\text{МНК}}]. \quad (2.14)$$

Выходная оценка азимута на момент T окончания интервала наблюдения вычисляется по функции (5)

$$\psi_{T, \text{МНК}} = \Psi_{H, \text{МНК}} + \omega_{\text{МНК}} T. \quad (2.15)$$

Обработка информации на основе интервального подхода

В случае постоянства азимута при описывающей функции (2.9)

выполняются следующие вычисления. На момент T окончания наблюдения рассчитывается информационный интервал $I_T(\psi)$ допустимых значений азимута, совместимых с заданной выборкой (2.6) и функцией (2.9). Нижняя $_{-}\psi$ и верхняя $^{+}\psi$ границы этого интервала рассчитываются по формулам

$$I_T(\psi) = [_{-}\psi, ^{+}\psi]: \quad _{-}\psi = \max_{n=1,N} \{_{-}\psi_n\}, \quad ^{+}\psi = \min_{n=1,N} \{^{+}\psi_n\}. \quad (2.16)$$

Вследствие отсутствия информации о вероятностных характеристиках погрешностей измерений, выходная оценка ψ_T азимута находится как середина интервала (2.16)

$$\psi_T = 0.5(^{+}\psi + _{-}\psi), \quad (2.17)$$

а искомая оценка её точности определяется как полуразмах интервала (2.17)

$$d\psi = 0.5 (^{+}\psi - _{-}\psi). \quad (2.18)$$

В случае переменного азимута с описывающей функцией (2.10) используется специальная технология, созданная для обработки зашумленных экспериментальных данных [37–40]. Рассмотрим основные расчётные процедуры.

Для каждой пары интервалов H_i и H_j , $i = 1, N - 1$, $j = i + 1, N$, неопределённости (2.8) замеров выборки (2.6) рассчитывается двумерное парциальное информационное множество $G_{i,j}(\psi_n, \omega)$ начального азимута и угловой скорости, совместимых с данной парой интервалов неопределённости

$$G_{i,j}(\psi_n, \omega), \quad i = 1, N - 1, \quad j = i + 1, N. \quad (2.19)$$

Далее, определяется информационное множество $I(\psi_n, \omega)$ значений параметров ψ_n , ω , совместимых со всей выборкой замеров

$$I(\psi_n, \omega) = \bigcap_{i=1, N-1, j=i+1, N} G_{i,j}(\psi_n, \omega). \quad (2.20)$$

Это множество характеризуется безусловными минимальными внешними оценками–интервалами параметров (минимальная внешняя box–оценка) $[_{-}\psi_n, ^{+}\psi_n]$ и $[_{-}\omega, ^{+}\omega]$. Данные интервалы рассчитываются следующим образом

$$[_{-}\psi_n, ^{+}\psi_n]: \quad _{-}\psi_n = \text{Arg}\{\min \psi_n \in I(\psi_n, \omega)\}, \quad ^{+}\psi_n = \text{Arg}\{\max \psi_n \in I(\psi_n, \omega)\} \quad (2.21)$$

$$[_{-}\omega, ^{+}\omega]: \quad _{-}\omega = \text{Arg}\{\min \omega \in I(\psi_n, \omega)\}, \quad ^{+}\omega = \text{Arg}\{\max \omega \in I(\psi_n, \omega)\} \quad (2.22)$$

Поскольку вероятностные характеристики погрешностей измерения неизвестны, то для дальнейшего расчёта “средней” аппроксимирующей

зависимости используются средние точки этих интервалов

$$\psi_{н,ср} = 0.5 ({}^+\psi_{н} + {}_-\psi_{н}) \text{ и } \omega_{ср} = 0.5 ({}^+\omega + {}_-\omega), \quad (2.23)$$

сама средняя зависимость рассчитывается как

$$\psi_{ср}(t) = \psi_{н,ср} + \omega_{ср} t, \quad t \in [0, T]. \quad (2.24)$$

Интервальный подход позволяет строить уточненную трубку гарантированных допустимых зависимостей [37–40]. Данная трубка $Tb(t)$ определяется своими нижней ${}_-\mathbf{Tb}(t_n)$ и верхней ${}^+\mathbf{Tb}(t_n)$ границами, рассчитываемыми по информационному множеству (3.29) следующим образом:

$$\mathbf{Tb}(t) = \{ {}_-\mathbf{Tb}(t_n), {}^+\mathbf{Tb}(t_n) \}, \quad t_n \in [0, T], \quad n = 1, N, \quad (2.25)$$

$${}_-\mathbf{Tb}(t_n) = \min_{(\psi_{н, \omega}) \in I(\psi_{н, \omega})} \{ \psi_{н+} \omega t_n \}, \quad (2.26)$$

$${}^+\mathbf{Tb}(t_n) = \max_{(\psi_{н, \omega}) \in I(\psi_{н, \omega})} \{ \psi_{н+} \omega t_n \}, \quad (2.27)$$

Выходные величины рассчитываются следующим образом. На конечный момент T времени наблюдения по информационному множеству (2.20) вычисляется интервал $[{}_-\psi_T, {}^+\psi_T]$ допустимых значений азимута с нижней и верхней границами

$${}_-\psi_T = \min_{(\psi_{н, \omega}) \in I(\psi_{н, \omega})} \{ \psi_{н+} \omega T \}, \quad (2.28)$$

$${}^+\psi_T = \max_{(\psi_{н, \omega}) \in I(\psi_{н, \omega})} \{ \psi_{н+} \omega T \}. \quad (2.29)$$

Вследствие отсутствия информации о вероятностных характеристиках погрешностей измерений, выходная оценка ψ_T азимута находится как середина интервала (2.21)

$$\psi_T = 0.5 ({}^+\psi_T + {}_-\psi_T), \quad (2.30)$$

а искомая оценка её точности определяется как полуразмах этого интервала

$$d\psi_T = 0.5 ({}^+\psi_T - {}_-\psi_T). \quad (2.31)$$

Оценки азимута и угловой скорости его поворота по регрессионному подходу находятся стандартным методом наименьших квадратов (МНК) в соответствии с рекомендациями ГОСТ [36, 41].

2.2. Разработка и аппаратная реализация устройств входящих в состав ЦМКС

Структура ЦМКС показана на рис 2.3. Принцип работы ЦМКС заключается в следующем:

При работе ЦМК непрерывно принимает и обрабатывает сигналы магнитного поля Земли и ГНСС для получения значения азимута. Полученный азимут, содержащий шум, затем обрабатывается методами фильтрации. Наконец, ЦМК передает пакеты данных NMEA0183 по стандартной форме компаса, несущие значение азимута, на устройства отображения. Внутри ЦМКС имеется буфер сигнала NMEA0183, который соединяет ЦМК с другими системами корабля и устройствами отображения. В системе имеется два устройства отображения: цифровое устройство отображения и репитер гирокомпаса. Эти два устройства устанавливаются на судне таким образом, чтобы позволить операторам удобно наблюдать необходимую информацию.

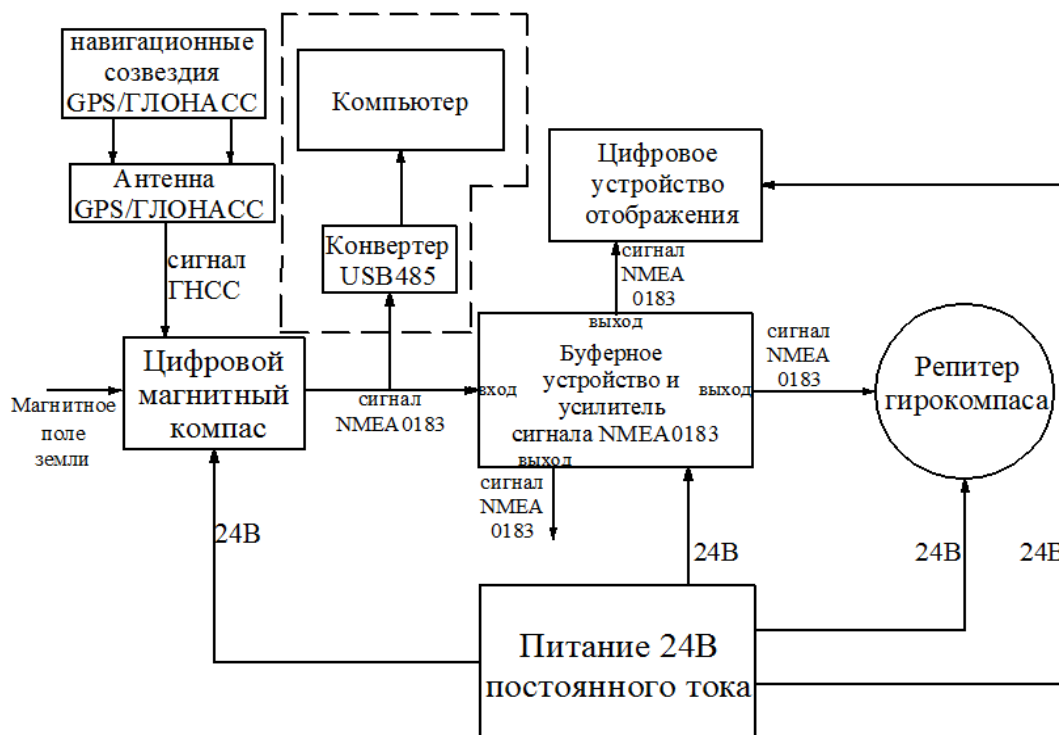


Рисунок 2.3. Структура ЦМКС

2.2.1 Разработка ЦМК

Структура ЦМК показаны на рис. 2.4. ЦМК содержит следующие блоки:

Датчик HMC5883L. Это блок преобразует сигнал магнитного поля Земли

че помощью встроенной микросхемы в электрический сигнал. HMC5883L позволяет измерить силу и направление магнитного поля Земли [42]. Выходной сигнал HMC5883L пропорционален напряженности магнитного поля в трех осях. Во время работы микроконтроллер ATMEGA128 [43] непрерывно считывает сигнал датчика HMC5883L по протоколу I²C [44] и после этого приступает к обработке и вычислению азимута на основе полученного сигнала.

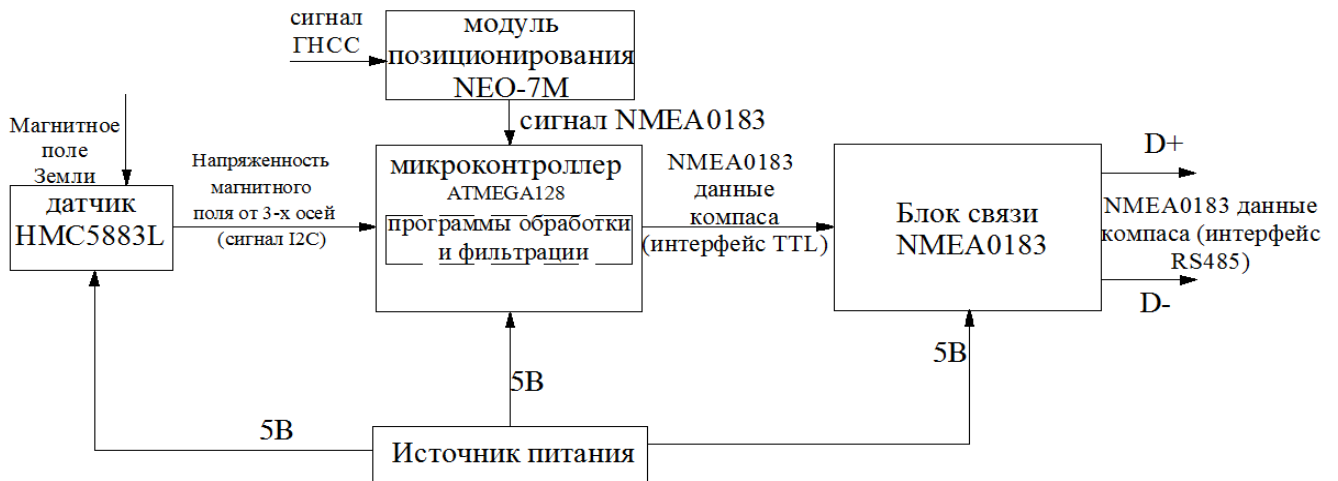


Рисунок 2.4 Структура ЦМК

Модуль NEO-7M [45,46]. Модуль NEO-7M обеспечивает прием сигналов от ГНСС, содержащих данные о координатах местоположения судна, которые в виде пакетов через блок связи NMEA0183 подаются в микроконтроллер ATMEGA128.

Источник питания. Используется для преобразования питания 24В постоянного тока в стабильное питание 5В для микроконтроллеров и внутренних ЦМК.

Микроконтроллер ATMEGA128 [43]. Предназначен для приема сигналов от двух модулей HMC5883 и NEO-7M, их обработки, фильтрации шумовых помех и вычисления уточненного значения угла азимута. В результате, микроконтроллер передает пакеты данных через NMEA0183 (содержащие азимут) на другие устройства системы. (Содержание методов обработки, расчета сигналов и фильтрации шума рассматривается в Главе 3.)

Блок NMEA0183. Основным компонентом данного блока является чип Max485 [47]. «На рис. 2.5. показан типичный пример сети связи с использованием

интерфейса RS485» [78].

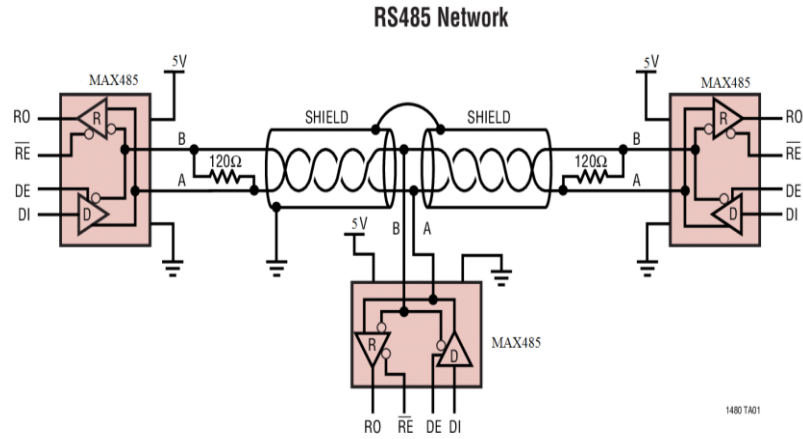


Рисунок 2.5. Интерфейс RS485

Блок эффективно подавляет линейные помехи путем преобразования сигнала уровня TTL в дифференциальный сигнал. Выход блока представляет собой цифровое сообщение NMEA0183 об азимуте которое передается индикаторным устройствам.

А. Разработка электрической схемы блоков ЦМК

Проектирование и изготовление блоков питания ЦМК

Конструкция схемы и печатной платы источника питания основаны на ПО Orcad 10.5 [48], а для разработки принципиальной схемы (рис 2.6) использовался интерфейс Orcad Capture.

В процессе разработки из различных вариантов микросхем стабилизатора напряжения был выбран чип стабилизатора импульсов LM2576 с улучшенными характеристиками [49]. Данная микросхема стабилизатора импульсного напряжения выдает выходное напряжение 5 В постоянного тока с запасом по току до 3 А. Принципиальная схема источника ЦМК показана на рис 2.7.

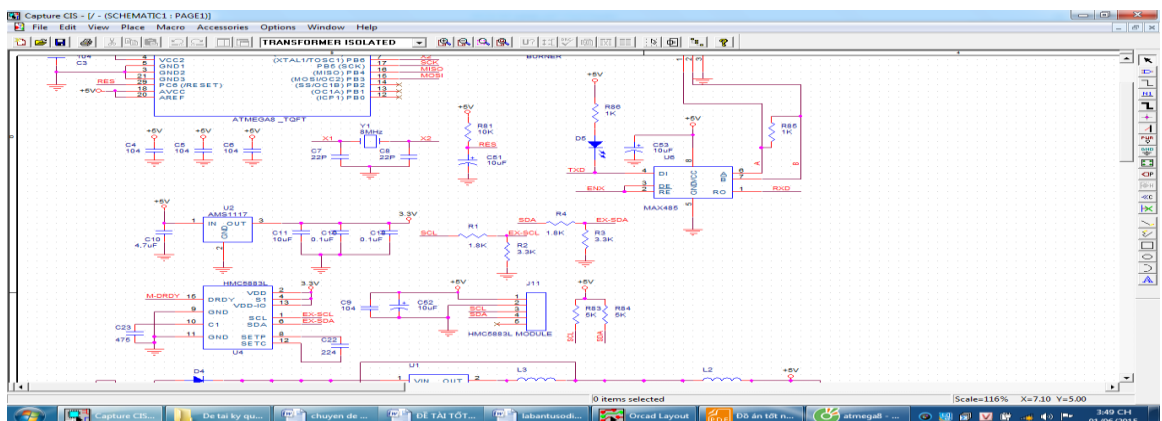


Рисунок 2.6 Интерфейс Orcad Capture, используемый для разработки принципиальных схем

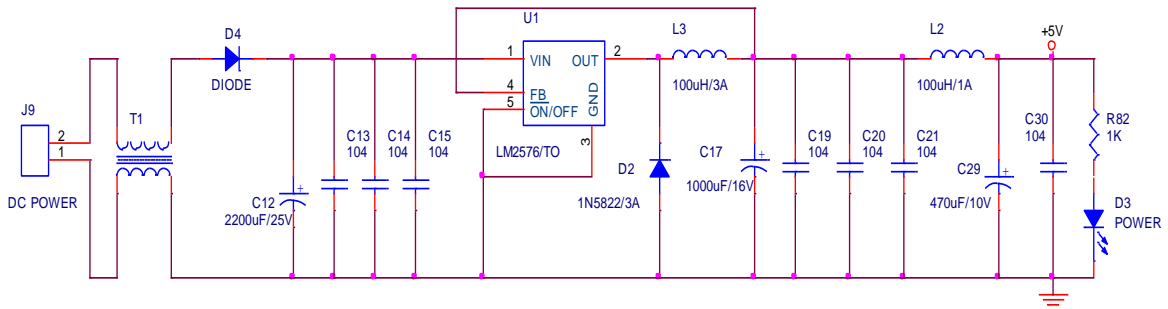


Рисунок 2.7 Принципиальная схема блока питания

Разработанный источник питания (рис 2.7) имеет следующие компоненты:

- разъем J9 служит для подключения внешнего источника питания к компасу; здесь входное напряжение постоянно и составляет от 12 до 24В;
- фильтр T1 выполняет фильтрацию входных помех, включая наводки и выбросы напряжения из-за работы корабельных электрических сетей и электрических силовых устройств; для надежного подавления помех индуктивность фильтра T1 была выбрана равной 35мГн;
- диод D4 (3А) выполняет входную полюсную защиту преобразователя;
- группа конденсаторов C12 – C15 выполняет дальнейшую фильтрацию помех и наводок во входном напряжении, группа конденсаторов C17, C19 – C21 и C29 и C30 вместе с индуктивностями L2 и L3 применены для фильтрации и стабилизации выходного напряжения источника питания;
- преобразование напряжения выполняется на чипе LM2576, его структура и общий вид приведены на Рисунок 2.8, а параметры указаны в Таб. 2.1;

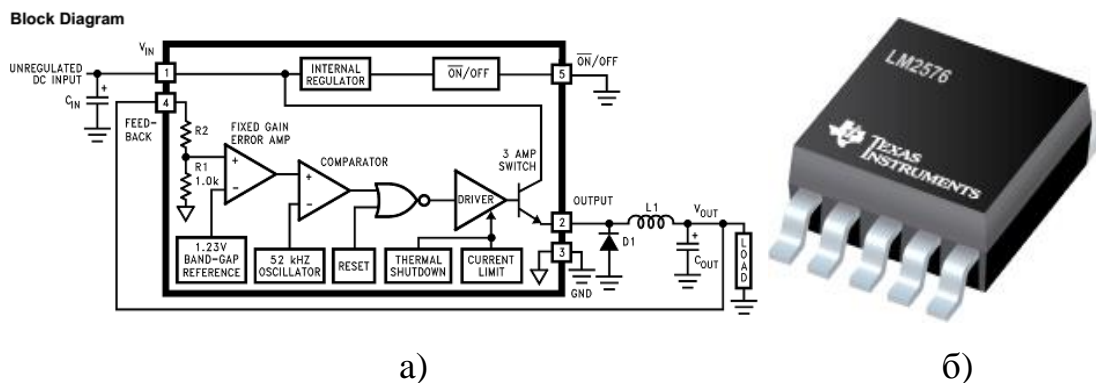


Рисунок 2.8 Внутренняя структура (а) и вид чипа LM2576 (б)

Таблица 2.1. Технические параметры чипа LM2576.

Тип преобразователя	step-down
Диапазон входных напряжений, В	4...60
Диапазон выходных напряжений, В	1.23...37
Максимальный выходной ток, А	3
Рабочая частота, кГц	52
Температурный диапазон, С	-40...+125
Тип корпуса	to-263-51

– светодиод D3 красного цвета используется для сигнализации и контроля работы источника питания.

Разработка, изготовление блок-приемника магнитного поля Земли для ЦМК

В процессе разработки было проведено много исследований с использованием магнитных датчиков для создания ЦМК [50–55]. Для ЦМК был выбран датчик HMC5883L. Это датчик с цифровым интерфейсом предназначен для измерений слабых магнитных полей в магнитометрах, магнитных компасах и т.д. «Датчик HMC5883 включает в себя встроенный магниторезистивный датчик высокого разрешения серии HMC118x, интегральную схему специального назначения (ASIC, содержащую усилитель), драйвер автоматического размагничивания, цепь сброса смещения и 12-битный АЦП» [78]. Это позволяет обеспечить точность первичного измерения направления магнитного поля в пределах 1–2 градуса.

Датчик HMC5883L имеет следующие параметры:

трехосевой модуль измерения магнитного поля; диапазон измерения магнитного поля ± 1.3 –8 гауссов; погрешность измерения направления магнитного поля от $0,5^{\circ}$ до $2,0^{\circ}$; напряжение питания 3–5 В постоянного тока; имеется возможность автоматической компенсации погрешностей измерений, наведенных металлическим корпусом корабля; использование протокола связи I²C;

Принципиальная схема блок-приемника магнитного поля Земли для ЦМК

на рис. 2.9.

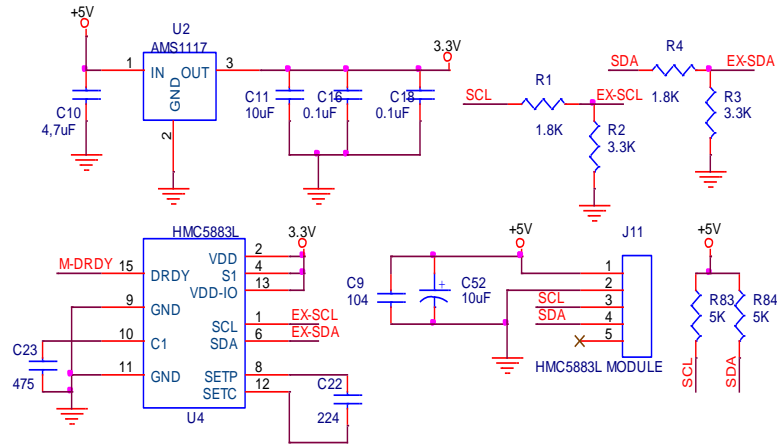


Рисунок 2.9. Схема блок–приемника магнитного поля Земли для ЦМК

Питание блока датчиков HMC5883L выполняется от преобразователя–стабилизатора на чипе AMS1117 с выходным напряжением 3.3В постоянного тока [56]. Для эффективного подавления помех от корабельных электросетей и сглаживания выходного напряжения в схему (Рисунок 2.9) введены конденсаторы C10, C11, C16, C18, C9, C52. Вид чипа AMS1117 представлен на рис. 2.10.



Рисунок 2.10. Чип стабилизатора напряжения AMS1117

Параметры чипа AMS1117:

Выходное напряжение 3,3 В постоянного тока; выходной ток 1А; рабочая температура $-40 \div 125^{\circ} \text{C}$.

Поскольку микросхема HMC5883 использует напряжение 3.3 В, цифровые сигналы на выходных выводах микросхемы будут соответствовать максимальному значению 3,3 В.

Высокий логический уровень на выводах микроконтроллера составляет 5В, поэтому для подключения к микроконтроллеру необходимо соответствующим образом преобразовать уровень логического напряжения. Для сопряжения

микроконтроллером с блоком датчиков HMC5883L были использованы два делителя напряжения R1/R2 и R3/ R4.

В соответствии с проектными стандартами последовательного протокола I²C, питание 5 В на контакты SCL и SDA подается через резисторы R83, R84 (рис. 2.9).

Согласно схеме связи микросхемы HMC5883L с микроконтроллером для подавления наводок предусмотрена установка конденсаторов C22 и C23.

Общий вид разработанного блок–приемника магнитного поля Земли представлен на рис. 2.11.

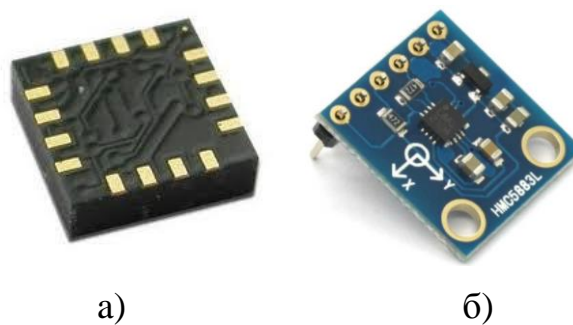


Рисунок 2.11. Вид магнитного датчика HMC5883L (а) и общий вид блок–приемника магнитного поля Земли (б)

Проектирование блока–приемника сигнала от ГНСС

Для получения сигнала от ГНСС, в ЦМК был использован GPS–модуль NEO–7М (рис. 2.12). Этот модуль относится к серии профессиональных модулей позиционирования и сочетает в себе низкое энергопотребление, высокую точность, а также, кроме GPS, поддерживает систему ГЛОНАСС [45, 46].

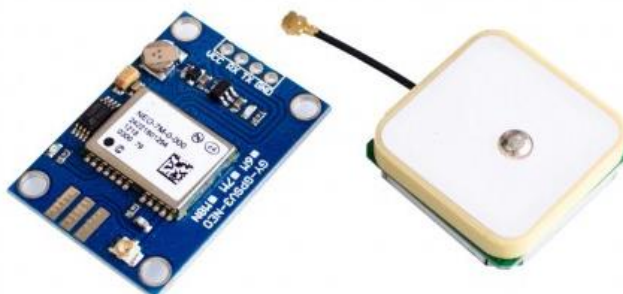


Рисунок 2.12. модуль NEO–7М.

Характеристики модуля NEO–7М : 56–ти канальное ядро 7–го поколения от u–blox; поддерживаемые системы позиционирования: GPS L1 C/A, GLONASS L1

FDMA, QZSS L1 C/A, SBAS: WAAS, EGNOS, MSAS, Galileo E1B/C; частота обновления данных до 10 Гц; точность позиционирования по GPS до 2.5 м, по GLONASS до 4 м; поддержка активных и пассивных антенн; интерфейсы UART, SPI, I²C, USB; скорость подключения по умолчанию по UART 9600 бод; напряжение питания 3 – 5В постоянного тока; размеры: 12.2 × 16.0 × 2.4 мм.

Принципиальная схема блок–приемника сигнала из ГНСС для ЦМК на рис. 2.13. Здесь два контакта приема и передачи сигнала NMEA0183 модуля NEO–7М подключены к последовательному порту UART1 микроконтроллера ATMEGA128, 2 резистора R1 и R2 имеют функцию делителя напряжения для согласования сигнала между микроконтроллером и модулем NEO–7М.

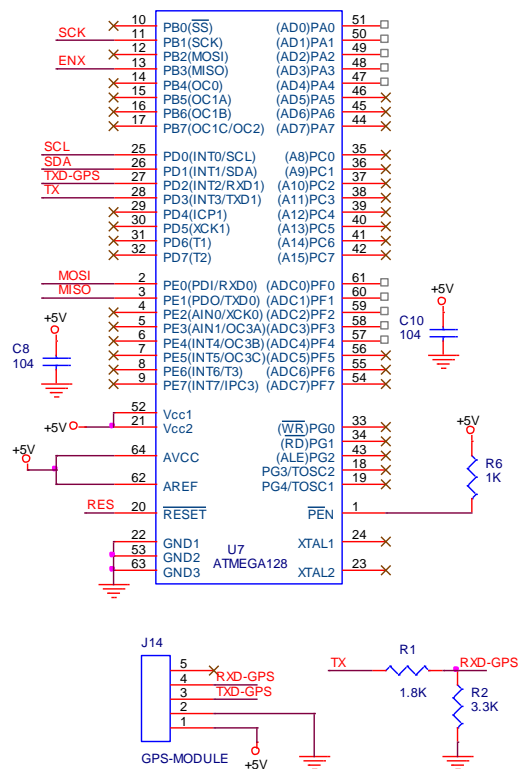


Рисунок 2.13. Блок схема приемника спутникового сигнала позиционирования.

Проектирование центрального процессора для ЦМК

Центральный процессор компаса является главным компонентом ЦМК. Он принимает, обрабатывает данные, выдает рассчитанную информацию и управляющие сигналы. Управление ЦМК осуществляется от микроконтроллера ATMEGA128. Маркировка входных контактов микроконтроллера и его общий вид показаны на рис 2.14.

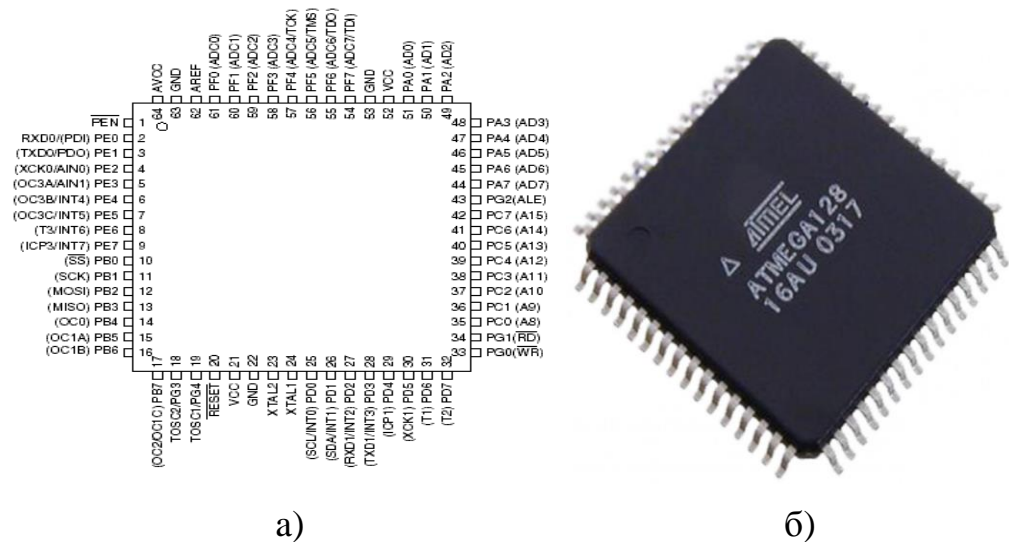


Рисунок 2.14. Маркировка контактов (а) и общий вид микроконтроллера АТМЕГА128 (б)

Принципиальная схема центрального процессора приведена на рис. 2.15.

Отметим следующие дополнительные элементы:

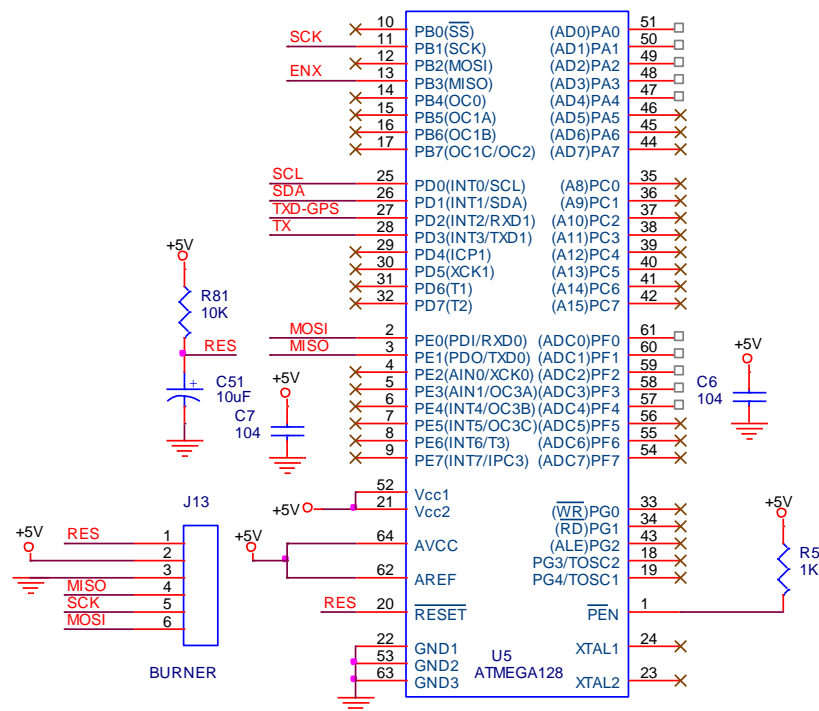


Рисунок 2.15. Принципиальная схема центрального процессора

- конденсаторы С6 и С7 используются для дополнительной фильтрации напряжения питания 5 В для микроконтроллера;
- резистор R81 и конденсатор С51, подключенные к выводу 20 (RESET) микроконтроллера АТМЕГА128, образуют схему его сброса;
- разъем J13 работает для загрузки программы в микроконтроллера.

Проектирование блока связи, передающего морские сигналы NMEA

Принципиальная схема стандартного блока морской связи NMEA показана на рисунке 2.16.

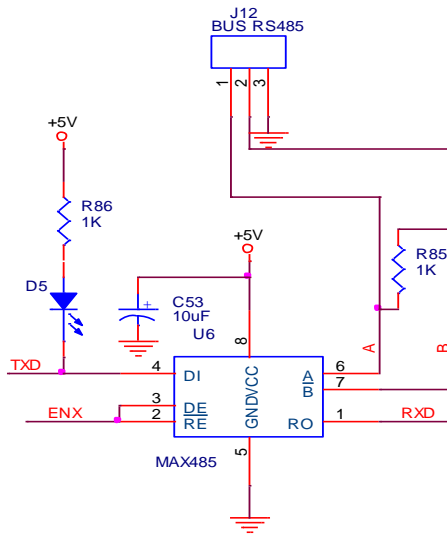


Рисунок 2.16. Схема блока связи морских сигналов NMEA

Функции компонентов блока связи:

Чип Max485. Преобразовывает сигнал данных NMEA в виде TTL из микроконтроллера в стандартный дифференциальный сигнал RS485. и передает его (вывод TXD) на вывод DI (4) микросхемы Max485. Микросхема Max485 преобразует сигнал TTL в уровень дифференциального напряжения на двух контактах A (6) и B (7). В частности, если логический уровень равен 0, напряжение A является положительным, а B – отрицательным. И наоборот, если логический уровень равен 1, то A является отрицательным, а B – положительным. Тогда сборщик данных на основе разности напряжений между двумя проводами будет знать, что логический уровень равен 0 или 1.

Вывод ENX (PD2) микроконтроллера ATMEGA128, подключенного к 2–выводу 2,3 микросхемы Max485, позволяет Max485 собирать или передавать данные. Когда ENX = 1, микроконтроллер позволяет передавать данные. Когда ENX = 0, – собирать данные с других устройств.

Контакты 5 (GND) и 8 (VCC) микросхемы Max485 подключены к источнику питания в 5 В цепи и отфильтрованы конденсатором 1 C53 (10 мкФ).

Два контакта 6, 7 чипа MAX485 соединены с клеммным резистором R85

(1К) для предотвращения помех на 2 линиях связи D+, D-. Резистор R85 работает для подавления шумов отражения на линии передачи. Логические уровни на указанных контактах чипа Max485 при его работе приведены в Таблице 2.2. Общий вид чипа показан справа от таблицы.

Таблица 2.2. Логические уровни на выводах чипа при его работе

Transmitting					Receiving			
Inputs			Outputs		Inputs			Outputs
\overline{RE}	DE	DI	A	B	\overline{RE}	DE	A-B	RO
X	1	1	1	0	0	0	+0.2V	1
X	1	0	0	1	0	0	-0.2V	0
0	0	X	Z	Z	0	0	open	1
1	0	X	Z	Z	1	0	X	Z



Светодиоды D5 в сочетании с резистором R86 (рис. 2.16) используются для визуального наблюдения за процессом передачи данных с микроконтроллера на микросхему Max485.

Разъем J12 используется для подключения ЦМК к внешним устройствам по стандарту RS485 [57].

Б. Схема принципиальной схемы оборудования ЦМК, его конструкция, изготовление печатной платы устройства ЦМК

Конструкция схемы и печатной платы разрабатывались с использованием ПО Orcad 10.5. Это профессиональное, простое в использовании программное обеспечение для разработки электронных схем. На рис 2.17 показан пример приложения Layout Plus для рисования печатных плат. Разработанная принципиальная схема устройства ЦМК приведена на рис 2.18.

Фактическая схема ЦМК после проектирования и изготовления представлена на рис 2.19.

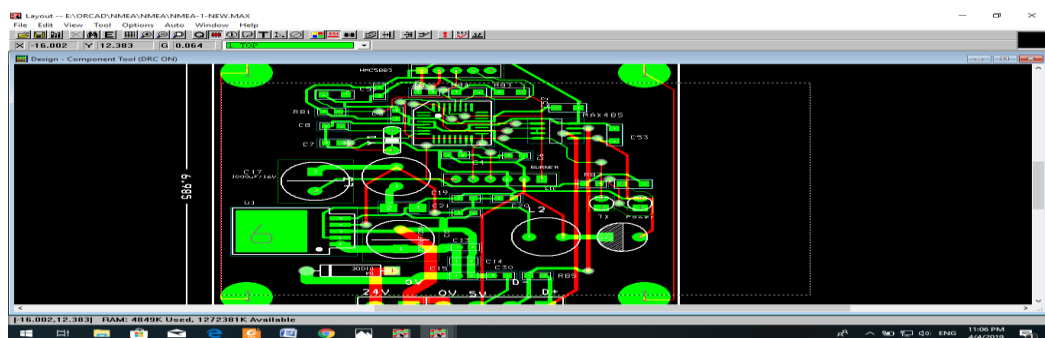


Рисунок 2.17 Приложение Layout Plus для рисования печатных плат

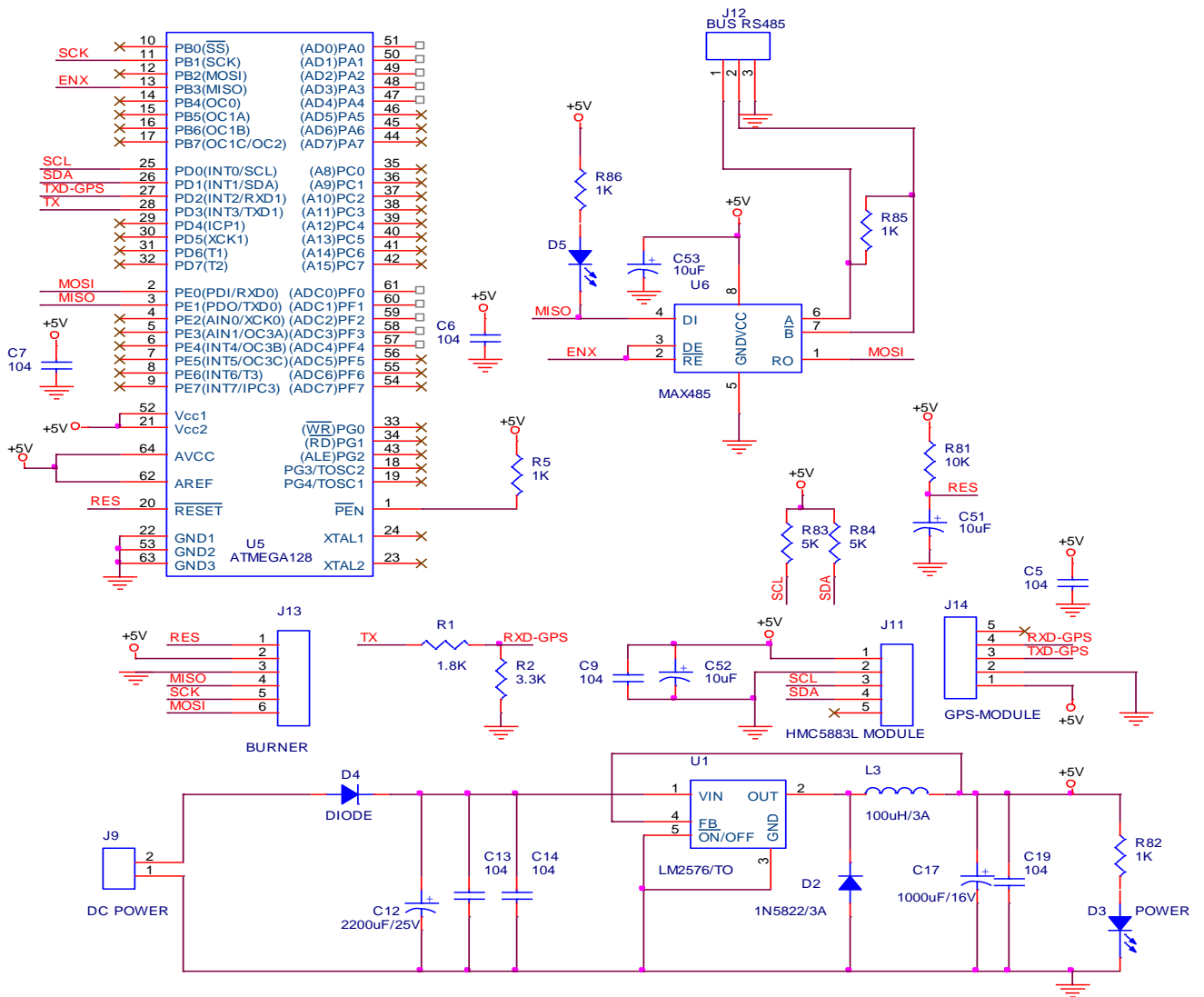


Рисунок 2.18. Принципиальная схема устройства ЦМК

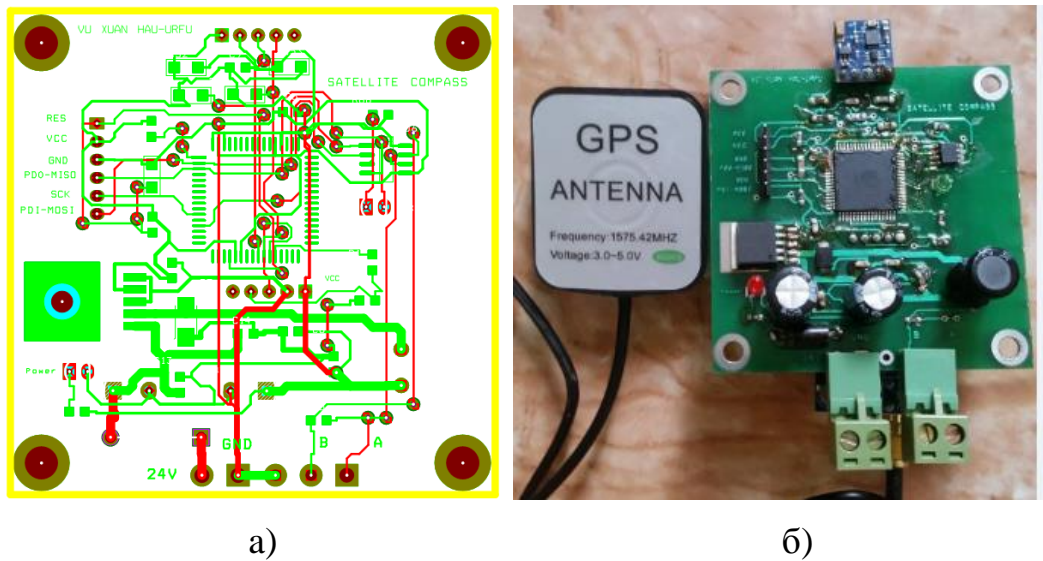


Рисунок 2.19. Фактическая схема компаса после проектирования и изготовления (а); печатная плата и общий вид ЦМК (б)

В. Механическая конструкция корпуса ЦМК

Вся сборка ЦМК помещена в грибовидный корпус. Корпус спроектирован для защиты от дождя, брызг и т.п., а также с устойчивостью к высоким и низким температурам окружающей среды. Приняты специальные меры защиты от электрических наводок и помех. Процесс проектирования корпуса оборудования ЦМК и использование современных станков с ЧПУ обеспечивают высокую точность изготовления корпуса ЦМК. Конструкция корпуса главного компаса ЦМК показана на рис. 2.20.

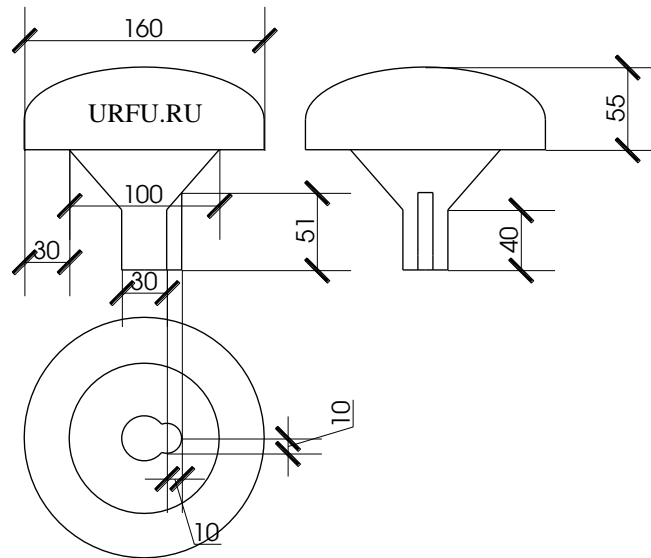


Рисунок 2.20. Конструкция корпуса ЦМК

Г. Результат разработки ЦМК

На рис. 2.21 показан общий вид ЦМК и его размещение в корпусе.



Рисунок 2.21. Вид ЦМК (а) и его размещение в корпусе (б)

Особенности построения и работы 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: входное питание от 12 до 36 В постоянного тока; потребляемый электрический ток 0.2А; 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

2.2.2 Разработка цифрового устройства отображения информации

Цифровое устройство отображения для визуализации и контроля текущего направления движения корабля. Блок–схема данного устройства показана на рис. 2.22.

Работа цифрового устройства отображения: При включении питания (или нажатии кнопки сброса) микроконтроллер ATMEGA16 [58] непрерывно получает сообщения NMEA0183 от ЦМК, обрабатывает эти данные и рассчитывает азимут корабля (направление его движения) и скорость его поворота. Наконец, направление и скорость судна отображаются на восьми 7–барных светодиодах на поверхности устройства.

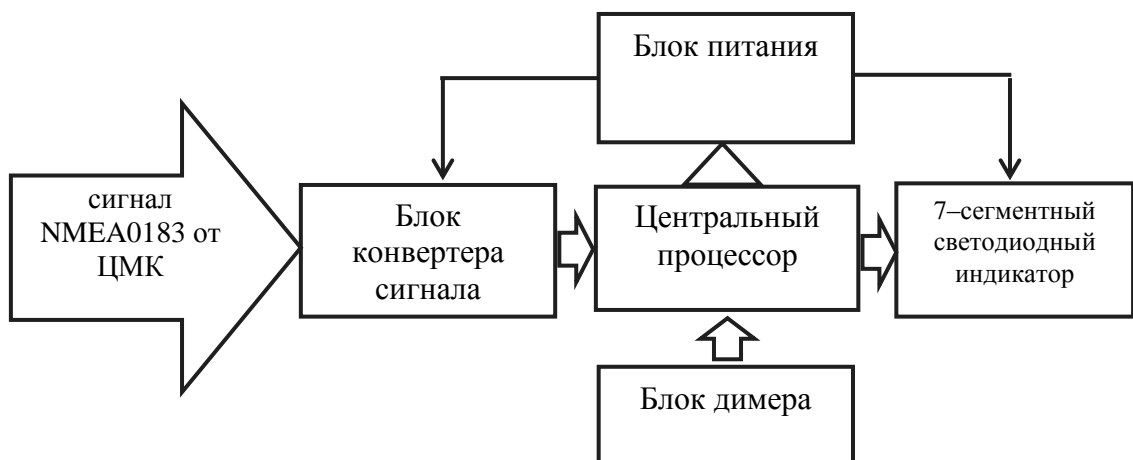


Рисунок 2.22. Структура устройства цифрового отображения информации

А. Разработка электрической схемы блоков цифрового устройства отображения

Разработка источника питания

Конструкция источника питания разрабатывалась также с помощью ПО Orcad capture 10.5. Вид чипа LM7805 и принципиальная схема источника питания показаны на рис. 2.23

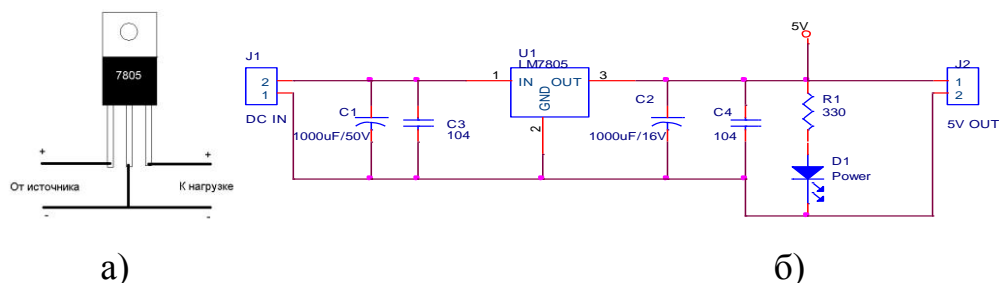


Рисунок 2.23. Чип LM7805 (а) и схема источника питания (б)

Разработанный источник питания основан на использовании надежного чипа LM7805, имеющего следующие параметры: корпус TO_220; максимальный ток нагрузки 1.5 А; диапазон допустимых входных напряжений до 40 В; выходное напряжение постоянного тока 5 В.

Проектирование аппаратуры центрального процессора

Принципиальная схема центрального блока управления показана на рис. 2.24. Маркировка контактов и изображение микроконтроллера ATMEGA16 показаны на рис. 2.25.

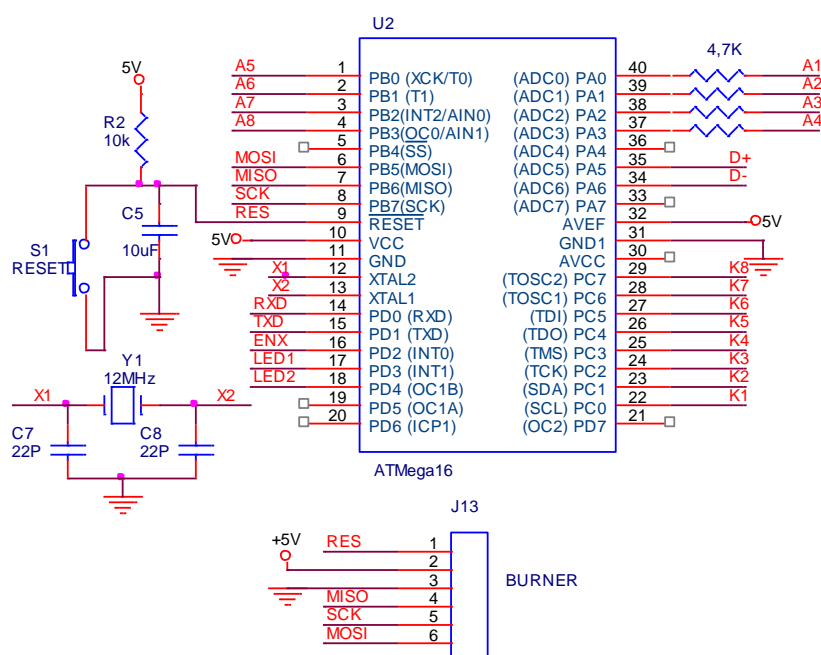


Рисунок 2.24. Принципиальная схема центрального блока управления

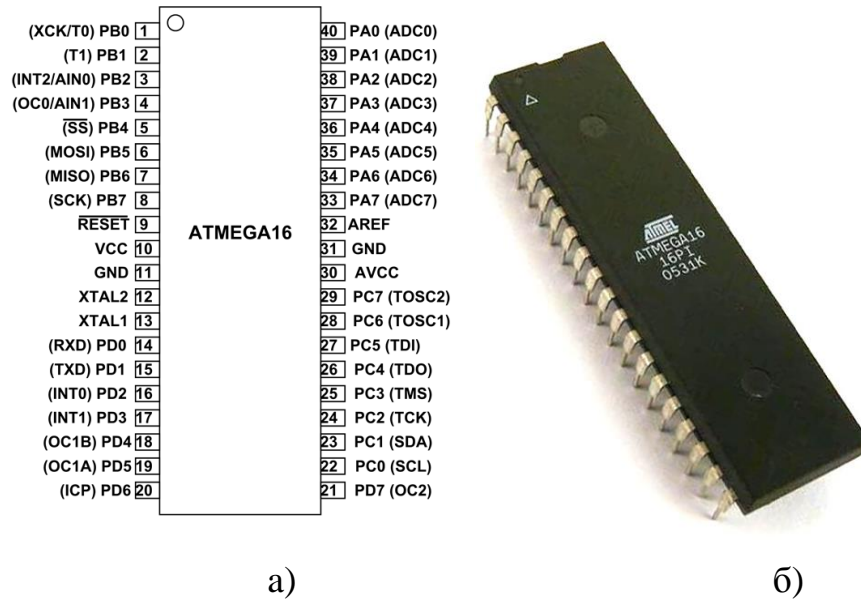


Рисунок 2.25. Маркировка контактов (а) и общий вид микроконтроллера АТМЕГА6 (б)

Входные и выходные контакты микроконтроллера АТМЕГА16:

Входные сигналы:

RES: Сброс сигнала, сброс схемы сброса;

RXD: получение данных NMEA0183;

D и D– контакты, которые сигнала регулирования яркости индикаторных устройств.

Выходные сигналы:

PIN A0–A3 используется для запитки четырех 7–сегментных светодиодов, указывающих азимут корабля;

PIN B0–B3 используется для четырех 7–полосных светодиодов, показывающих скорость вращения корабля;

PIN C0–C7 используется для передачи 8–бит данных на восемь светодиодных баров.

Для повышения устойчивости работы и защиты от помех для микроконтроллера была использована схема (рис. 2.24) внешнего кварцевого генератора. Генератор включает в себя кварц Y1–12 МГц и конденсаторы C7 и C8 для фильтрации помех. Кварцевая схема внешнего генератора соединена с выводами XT1 и XT2 микроконтроллера.

Схема сброса для микроконтроллера включает резистор R2, и кнопку Reset S1 и конденсатор C5, подключенный к GND. Разъем J13 используется для загрузки программы для микроконтроллера ATMEGA16.

Разработка блока конвертера сигнала RS485 → TTL

Блок конвертера сигнала выполняет преобразование физического сигнала NMEA0183 в формате RS485 в сигнал формата TTL для микроконтроллера ATMEGA6. Принципиальная схема приемника сигнала NMEA0183 показаны на рис. 2.26.

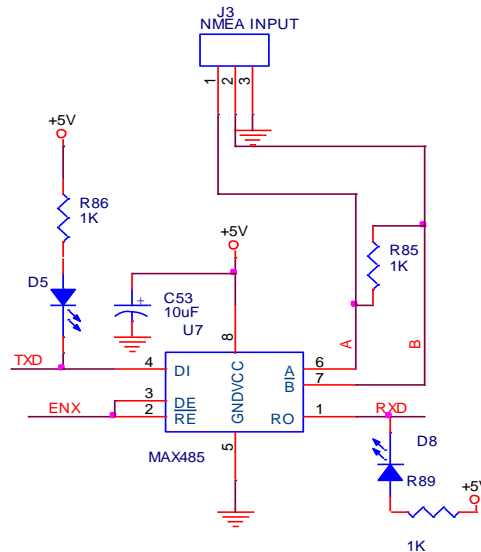


Рисунок 2.26. Принципиальная схема блока конвертера сигнала RS485 → TTL

Разработка 7–сегментного светодиодного дисплея

Для отображения азимута и скорости поворота корабля применен дисплей с использованием восьми 7–сегментных светодиодов с общим анодом. Для одновременного отображения информации на светодиодах используется соответствующее программное обеспечение сканирования светодиодов.

7–сегментный светодиод – это электронный компонент, используемый для отображения чисел. Преимуществами 7–сегментных светодиодов являются низкая стоимость, наблюдаемое расстояние и простота использования в программировании. Недостатком является то, что 7–сегментный светодиод показывает только определенное количество символов. Вид изображения на 7–сегментном светодиоде и его структурная схема приведены на рис. 2.27 и 2.28.

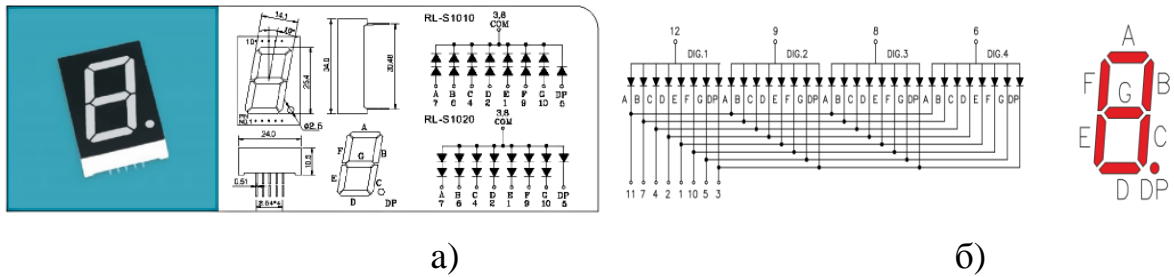


Рис.2.27. Вид изображения на 7–сегментном светодиоде (а) и его структурная схема (б)

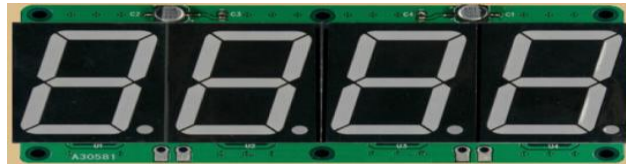


Рис.2.28. Полный вид используемого LED 7 сегмента

Принципиальная схема 7–сегментного светодиодного дисплея приведена Рисунок 2.29. Восемь транзисторов A1015 (рис. 2.29) выполняют сканирование светодиодов [59].

В 7–сегментном светодиодном блоке дисплея используются восемь 7–полосных общих анодных светодиодов. Катод из 7 столбцов на каждом светодиоде соединен вместе и подключен к PORTC микроконтроллера (PC0–PC7), порт C будет выводить данные дисплея для светодиодов 7 столбцов. 7–полосное управление светодиодным сканированием осуществляется через 8 выводов микроконтроллера PA0, PA1, PA2, PA3, PB0, PB1, PB2, PB3. В блоке используется 8 транзистор A1015, используемый для питания 7–сегментного светодиода. Если один из выводов микроконтроллера (PA0, PA1, PA2, PA3, PB0, PB1, PB2, PB3) выдает логический низкий уровень (0В), то резистор 4.7к вызывает прохождение через A1015, насыщение и питание сборки LED 7, которая загорается.

Спецификация транзистора A1015 имеет $I_c \text{ макс} = 300 \text{ мА}$.

Часть светодиодного света 7 бар, когда свет потребляет ток 15мА. Мы выбираем линию, когда горят все 7 сегментов 1 лампы, тогда потребление тока составляет $7 * 15\text{мА} = 105 < 300\text{мА} = I_c \text{ макс}$. Таким образом, мы можем выбрать A1015 для питания LED 7 сегмента.

Для транзистора A1015 параметр усиления тока базы $\beta = 50$.

Ток базы будет равен $I_B = I_C / \beta = 105/50 = 2.1$ (мА)

Следовательно, полярное сопротивление R коллектора для насыщения транзистора A1015 составляет:

$R = (5V - V_{BE}) / I_B = (5 - 0.7) / 0.0021 = 2047(\Omega)$. Для глубокого насыщения A1015 мы выбираем резистор $R = 4.7K\Omega$.

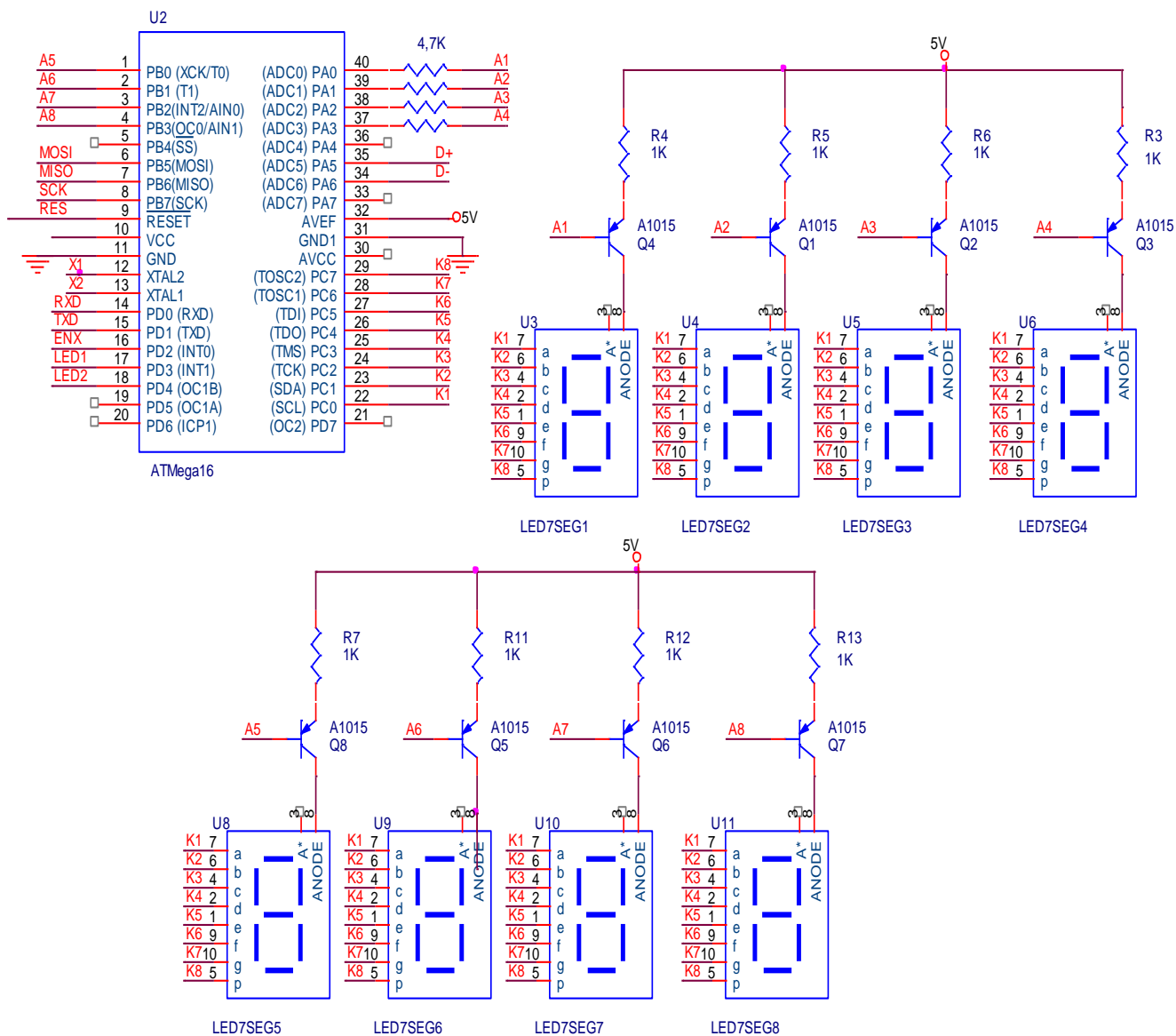


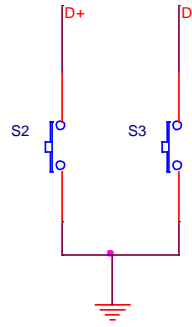
Рис.2.29. Схема аппаратного принципа 7–сегментного блока светодиодных индикаторов

Разработка блока регулировки яркости дисплея

Для регулировки яркости восьми 7–полосных светодиодов устройство имеет две высоконадежные кнопки. Кнопка D – подключена к контакту PA6 микроконтроллера. Кнопка D+ подключена к выводу PA5 микроконтроллера. Общий вид кнопки и подключение кнопок D– и D+ показаны на рис. 2.30.



а)



б)

Рисунок 2.30. Общий вид (а) и подключение кнопок регулировки яркости дисплея (б)

Б. Принципиальная схема цифрового устройства отображения

Принципиальная схема цифрового устройства отображения приведена на рис. 2.31.

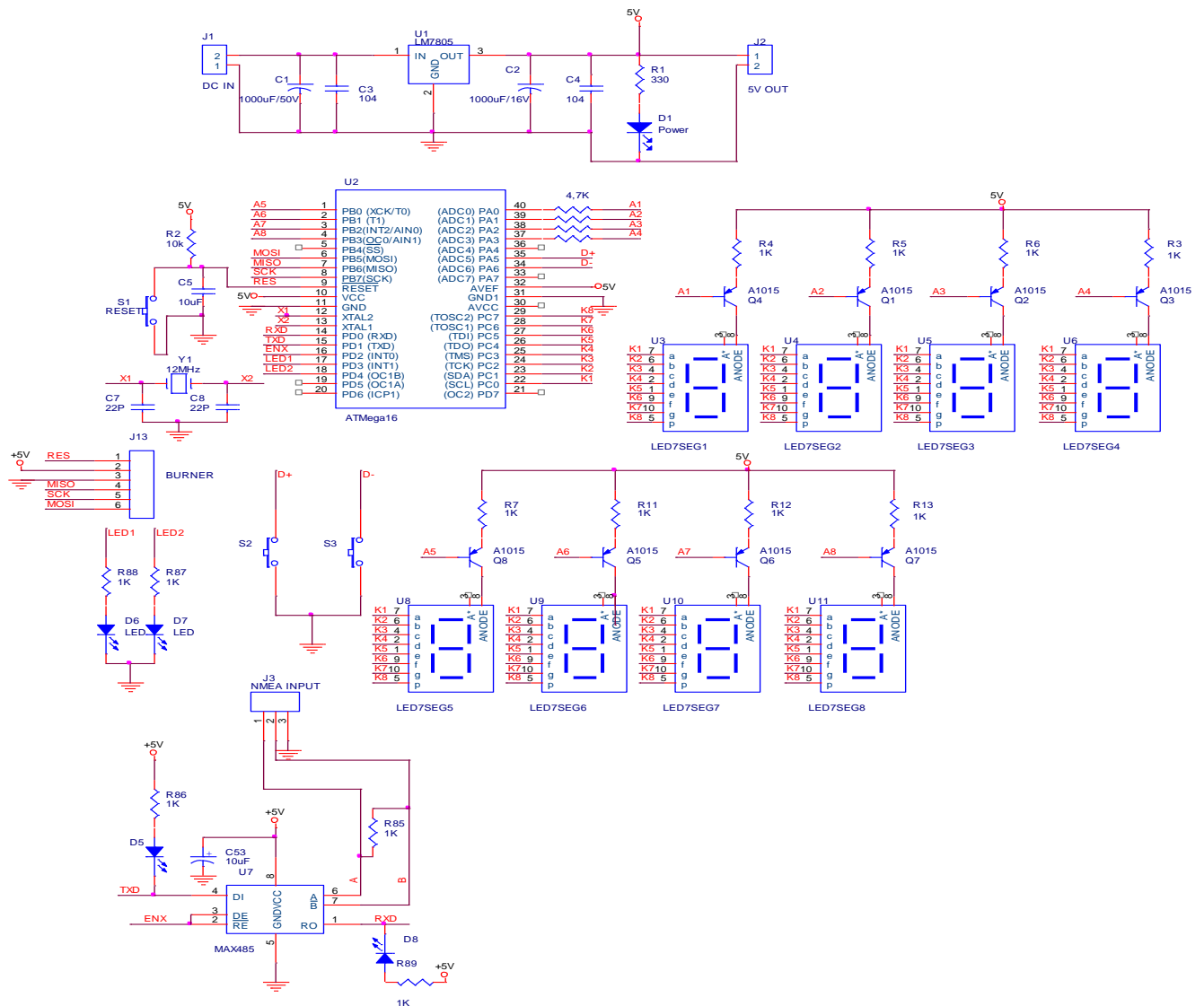


Рисунок 2.31. Принципиальная схема цифрового устройства отображения

В. Приборная реализация цифрового устройства отображения

Приборная реализация устройства цифрового отображения (в соответствии со схемой рис. 2.31) показана на рис. 2.32 (лицевой вид и вид с внутренней стороны).

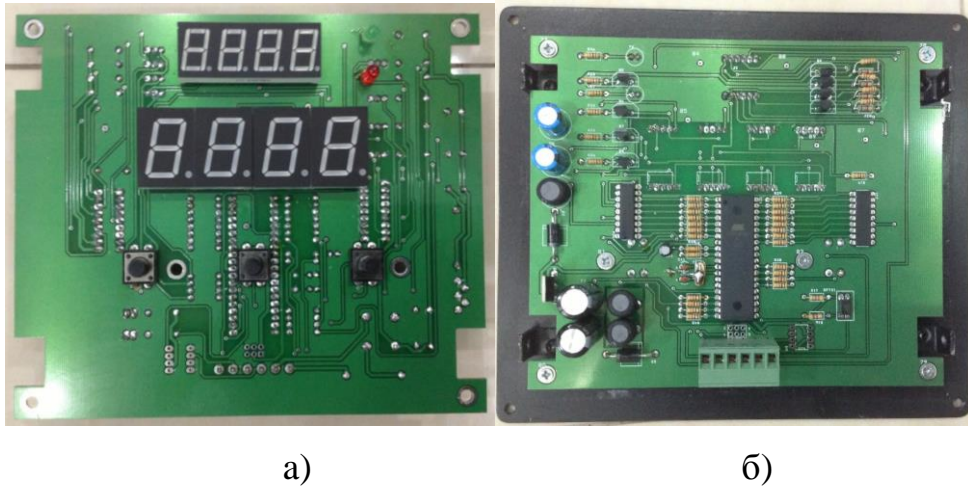


Рисунок 2.32. Лицевой вид (а) и вид снизу на плату устройства отображения (б)

Г. Механическая конструкция корпуса для цифрового устройства отображения информации

Механический корпус устройства отображения был разработан с использованием ПО Autocad и Corel. Корпус изготовлен из алюминиевого материала с обеспечением коррозионной устойчивости и с антиэлектростатической окраской по соответствующим стандартам качества. Чертежи корпуса цифрового устройства отображения показаны на рис. 2.33. Лицевой вид устройства отображения приведен на рис. 2.34.

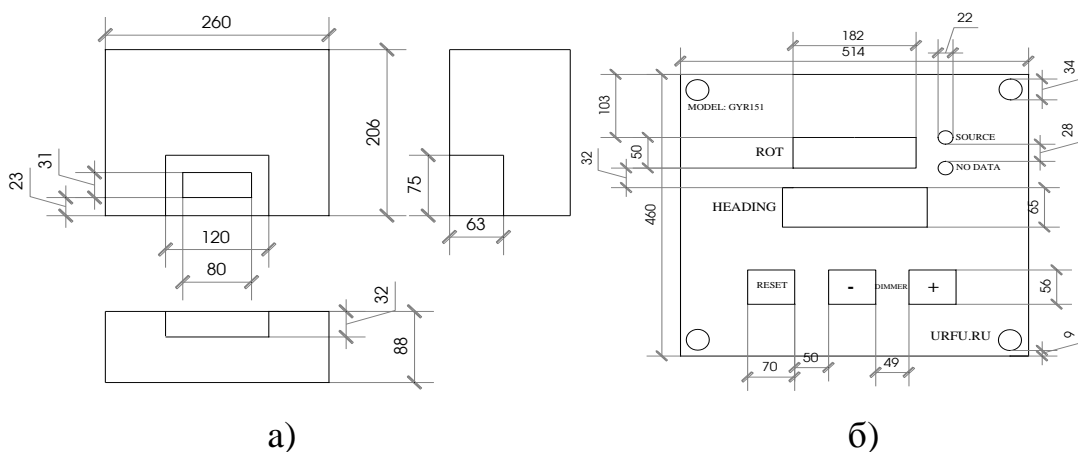


Рисунок 2.33. Чертежи корпуса цифрового устройства отображения

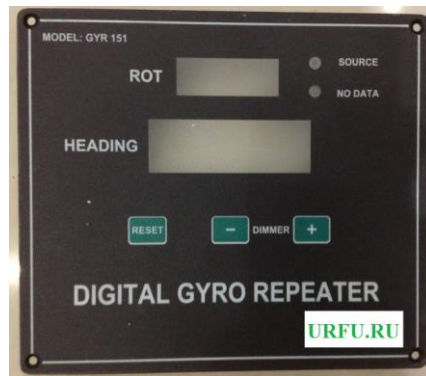


Рисунок 2.34. Лицевой вид цифрового устройства отображения

Д. Приборная реализация комплекта цифрового устройства отображения

Полный вид комплекта цифрового устройства отображения показан на рис. 2.35. 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.



Рисунок 2.35. Общий вид комплекта устройства цифрового отображения

2.2.3 Разработка репитера гирокомпаса

Структура репитера гирокомпаса, показана на рисунке 2.36. Принцип работы репитера гирокомпаса заключается в следующем: При включении устройства или нажатии кнопки (RESET) на блоке управления, микроконтроллер ATMEGA8 вернет иглу обратно в 0 градусов. Затем микроконтроллер принимает пакеты данных NMEA0183 из ЦМК, преобразует сигналы в формат и передает сигнал в микроконтроллер ATMEGA8 для выполнения обработки данных.

Обработка данных осуществляется в соответствии с запрограммированными алгоритмами. Далее соответствующие управляющие импульсы выдаются на блок питания шагового двигателя.

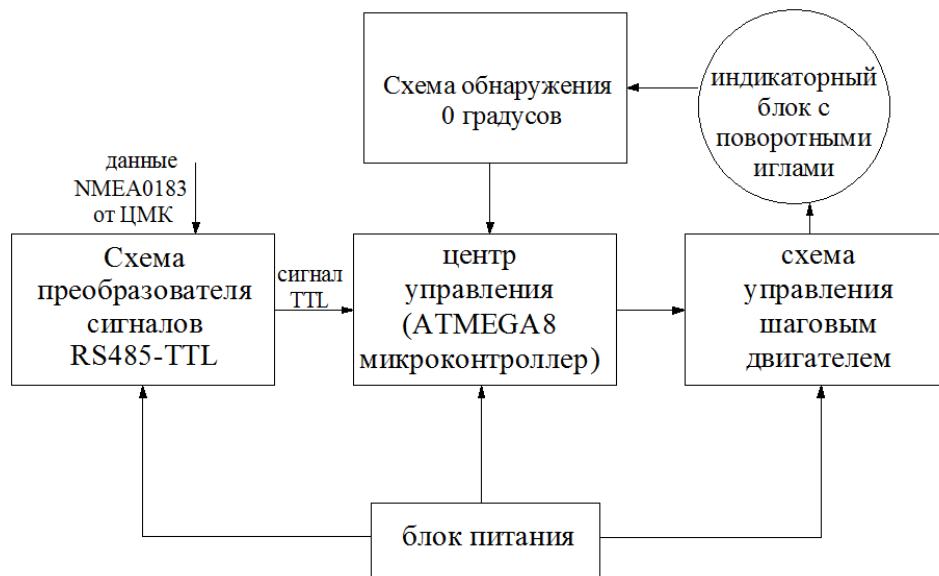


Рисунок 2.36. Структура репитера гирокомпаса

А. Разработка электрической схемы блоков репитера гирокомпаса

Проектирование блока питания

Исходя из требований к Репитеру, было выполнено проектирование силового блока с обеспечением, помехоустойчивости, стабильности выходного напряжения и требуемого тока нагрузки. Схема цепи питания репитера гирокомпаса, как показано на рисунке 2.37.

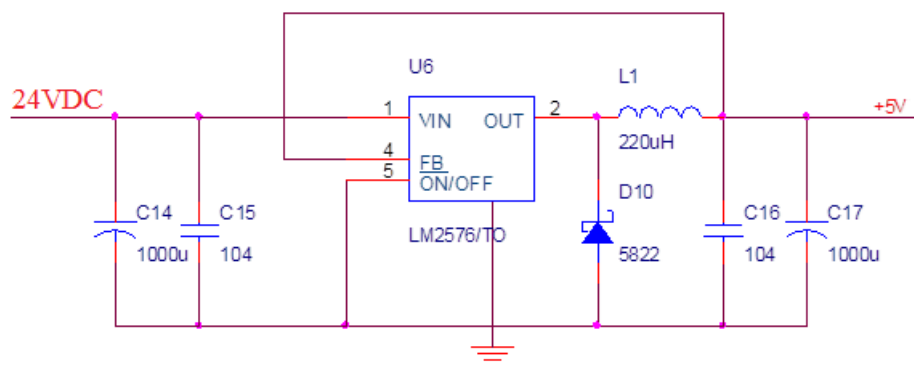


Рисунок 2.37. Принципиальная схема цепи питания репитера гирокомпаса

Проектирование центра управления Репитера

Принципиальная схема центра управления Репитера приведена на рис.2.38. Схема управления содержит микроконтроллер ATMEGA8 [60], цепь сброса микроконтроллера и кварцевый контур внешнего генератора. Схема генератора

содержит: кварц Y1–12 МГц; два фильтрующих конденсатора C1 и C2. Два конца кварцевой схемы внешнего генератора подключены к контактам XT1 и XT2 микроконтроллера.

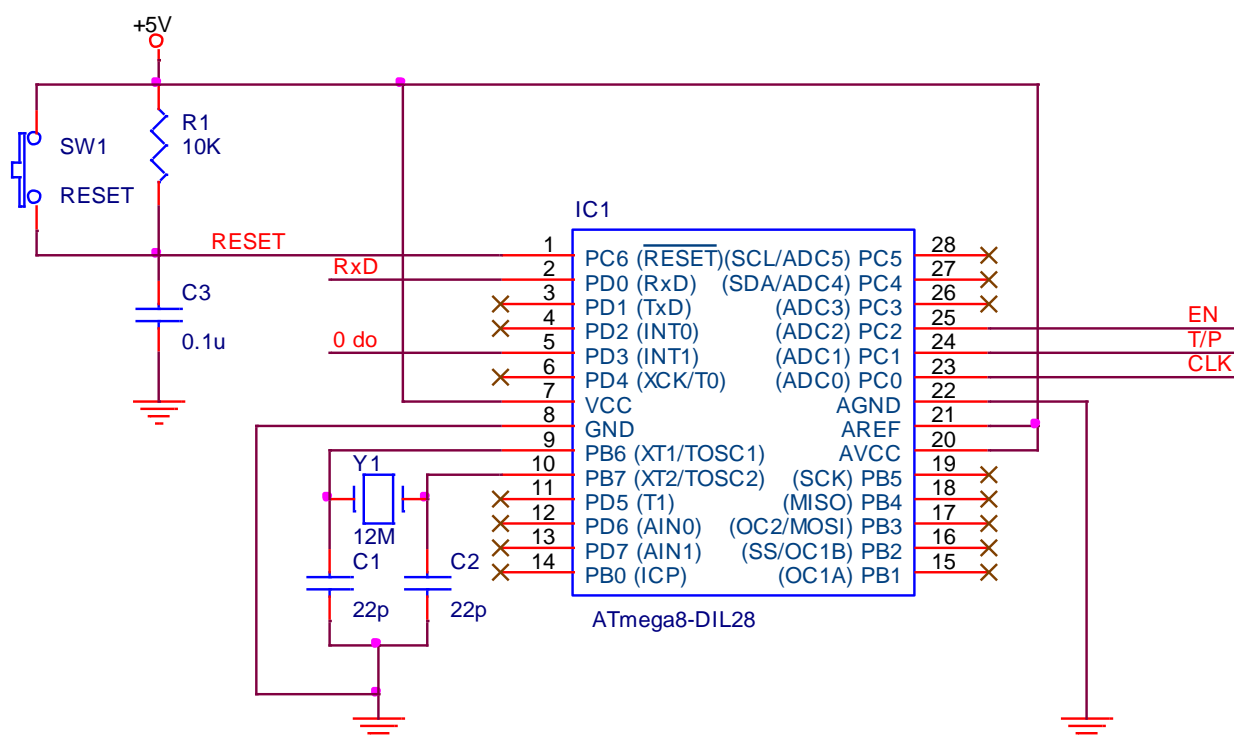


Рисунок 2.38 Принципиальная схема центра управления Репитера

Компоненты блока и их работа:

- соединение положительного электрода через сопротивление R1;
- SW1 кнопка зарядки конденсатора C3; обычно, когда кнопка SW1 не нажата, линия RESET подключается к напряжению +5В через резистор R1; при нажатии кнопки SW1 источник +5В подключается к конденсатору C3, напряжение выше R1 падает до 0В, через вывод RESET запитывается микроконтроллер ATMEGA8.

Входные и выходные контакты микроконтроллера ATMEGA8:

0 do 0–градусный сигнал обнаружения подключен от схемы обнаружения 0–градусного угла, установленной в механизме индикатора; этот сигнал подключен к контакту жесткого прерывания INT1.

RESET – сигнал перезапуска, подключающий схему сброса.

RxD через этот вывод микроконтроллер получает сигнал NMEA0183 от ЦМК.

EN – сигнал управления поворотом шагового двигателя.

T/P – сигнал, указывающий направление вращения вала двигателя, влево или вправо.

CLK – импульсный сигнал возбуждения двигателя.

Проектирование схемы управления шаговым двигателем

Принципиальная схема блока управления шаговым двигателем показана на рис. 2.39.

Компоненты схемы:

R4, C4 – элементы синхронизирующего генератора.

R2, R3: Это два силовых резистора, которые измеряют рабочий ток и защищают шаговый двигатель от перегрузки во время его работы.

D4 – D8 – диоды силового моста L298.

Для работы вывод (ENABLE) микросхемы L297 [61,62] необходимо установить на высокий логический уровень (VCC). Чтобы двигатель начал работать вывод (HALF/FULL) должен быть установлен на уровень 1 и поданы импульсы CLOCK. При наличии импульса CLOCK микросхема L297 проверит состояние управления пошаговым перемещением, на прямое и обратное вращение, подаст сигнал на выходы A, B, C и D и затем передаст его микросхеме L298 [63].

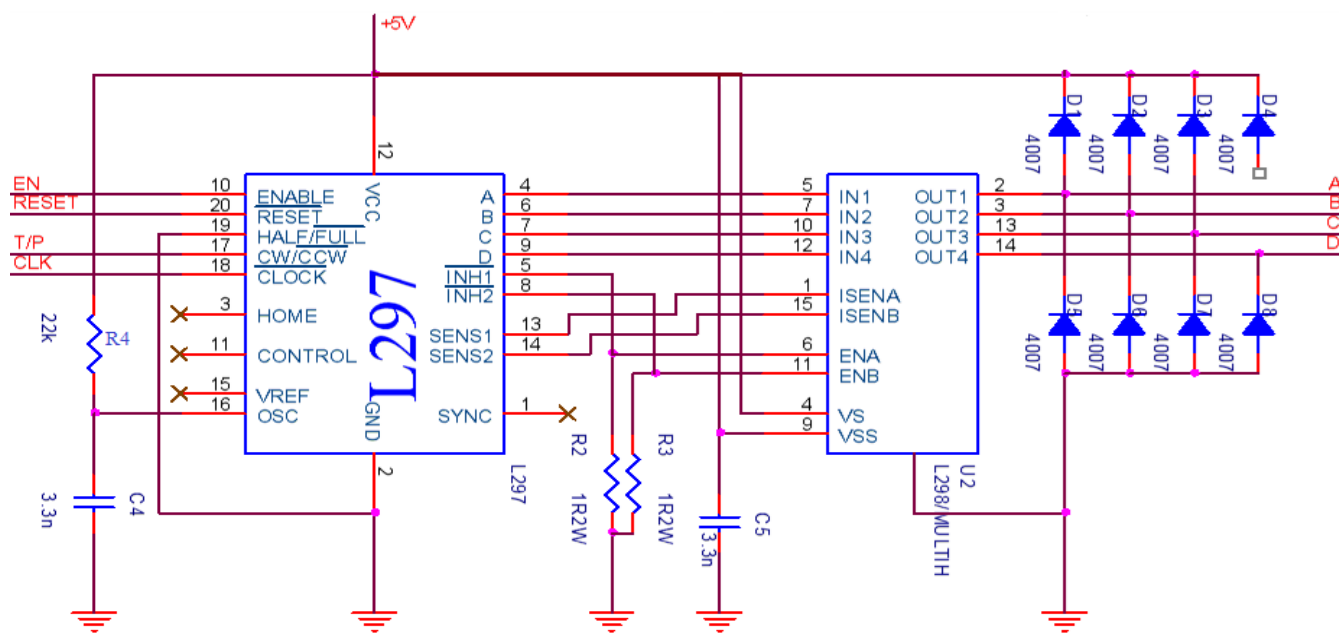


Рисунок 2.39. Принципиальная схема управления шаговым двигателем

L298 принимает соответствующий логический импульс L297 и усиливает сигнал, поступающий на шаговый двигатель. Когда нет импульса CLOCK, двигатель остановится. Для сброса контроллера необходимо установить вывод (RESET) L297 на логический 0.

Блок управления шаговым двигателем L297 вместе с силовым мостом L298 принимает управляющие сигналы от микроконтроллера и генерирует все типы управляющих импульсов для силовой ступени. Микросхема L297 имеет функцию генерации логических сигналов для переключения обмоток двигателя.

В ЦМК использован надежный шаговый двигатель SANYO DENSIKY с напряжением питания 24В постоянного тока, двумя обмотками и 6 выходными проводами. Схема и общий вид шагового двигателя показаны на 2.40.

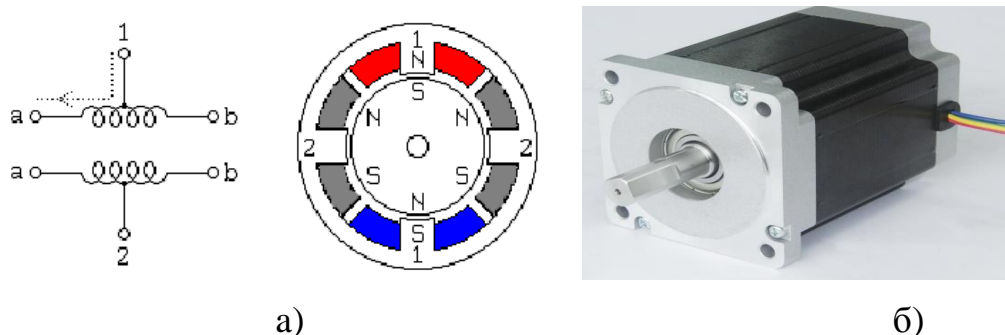


Рисунок 2.40. Схема включения обмотки двигателя (а). Внешний вид шагового двигателя Репитера (б)

Проектирование схемы преобразователя сигналов RS485→TTL

Принципиальная схема преобразователя сигналов RS485→TTL приведена на рис. 2.41.

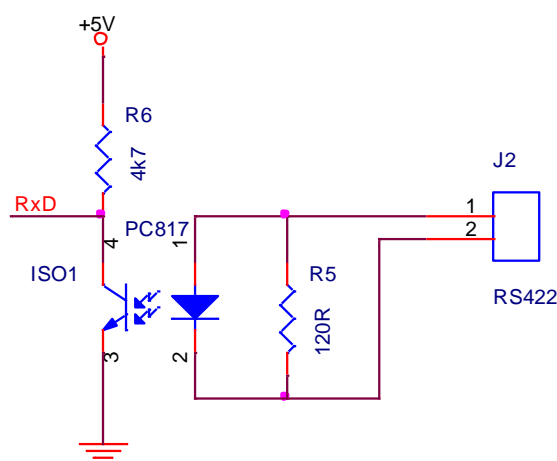


Рисунок 2.41. Принципиальная схема преобразователя сигналов RS485–TTL

Существует несколько типов развязки электрических цепей. При разработке репитера гироскопа была использована оптическая развязка (рис. 2.40), что позволило избежать взаимного влияния и наводок между модулем управления и блоком магнитных датчиков.

Преобразователь сигналов содержит следующие компоненты.

Резистор R5 формирования входного дифференциальный сигнал с оптической развязки.

ISO1 – оптическая развязка.

R6 – ограниченное сопротивление тока оптической развязки.

Проектирование схемы обнаружения 0 градусов азимута

Принципиальная схема устройства обнаружения 0 градусов приведена на рис. 2.42.

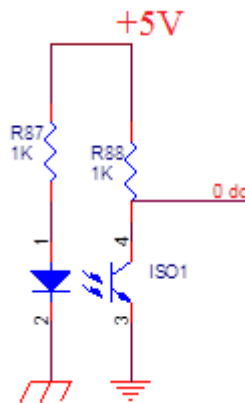


Рисунок 2.42. Принципиальная схема устройства обнаружения 0 градусов

Компоненты схемы и их работа.

ISO1 (PC817) [64] – Оптопара транзисторная, установленный на индикаторном механизме.

R88 – резистор, ограничивающий ток С–электрода фототранзистора.

R87 –ограниченный токовый резистор для LED.

Обычно, во время вращения механизма индикатора, светодиод будет непрерывно передавать свет на фототранзистор. Фототранзистор переходит в состоянии насыщения, и напряжение на полюсе С падает примерно до 0 В. Когда индикаторный механизм поворачивается на угол 0 градусов, фототранзистор переходит в режим блокировки. Напряжение на клемме С будет на высоком

логическом уровне 5В). Этот высокий логический уровень подается на микроконтроллер, который таким образом определяет рулевое положение стрелки.

Проектирование индикаторного блока с поворотными стрелками

Механическая структура индикации в Репитере состоит из двух вращающихся дисков, фиксированной стрелки, зубчатой передачи и шагового двигателя (Рис. 2.43).

Дисковый двухшкальный индикатор включает в себя большой индикаторный диск и малый индикаторный диск для грубого и точного считывания азимута, соответственно.

Большой индикаторный диск

Его окружность разделена на 360 делений, на его лицевой стороне нанесены деления с числами от 000 до 360. Таким образом, грубое разрешение его шкалы составляет 1 градус. На поверхности диска есть 24-лучевая звезда, в которой четыре самых больших крыла соответствуют Югу (S), Северу (N), Западу (W) и Востоку (E); при этом северный луч напечатан черным. Остальные лучи отображают промежуточные значения направлений: 8 лучей среднего размера и 16 коротких лучей.

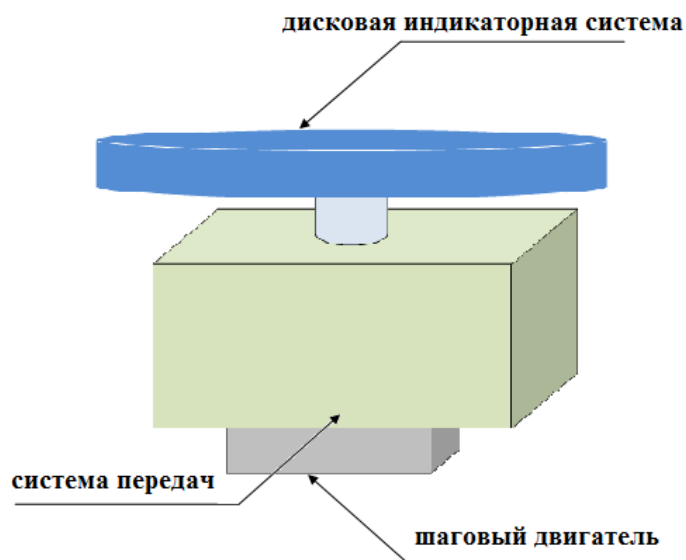


Рисунок 2.43. Общий вид механической части Репитера гирокомпаса

Малый индикаторный диск предназначен для точного считывания азимута. Один поворот малого диска соответствует 10 географическим градусам. По его

окружности нанесено 100 делений; так что одно деление соответствует 0,1 градусу.

Движение большого и малого индикаторных дисков с указанной дискретностью обеспечивается стандартными механическими зубчатыми передачами с соответствующими передаточными числами.

Б. Результаты изготовления Репитера гирокомпаса

Результаты изготовления схем для Репитера гирокомпаса

После проектированию печатных плат элементов Репитера и монтажа компонентов, Репитер имеет вид, представленный на рис. 2.44.

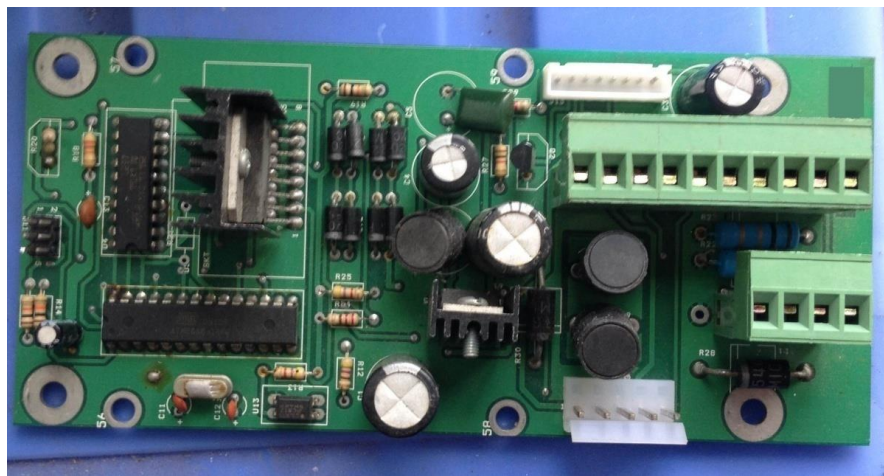


Рисунок 2.44. Общий вид изготовленного Репитера гирокомпаса

Изготовление зубчатой трансмиссии Репитера

Была спроектирована и изготовлена гибридная система зубчатой трансмиссии Репитера. Условная схема трансмиссии показана на рис. 2.45.

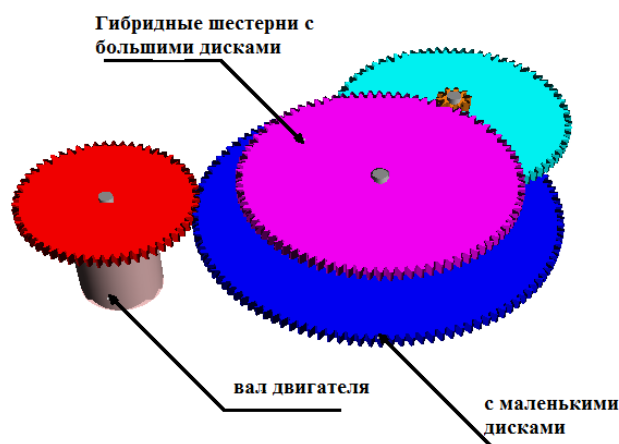


Рисунок 2.45. Условная схема зубчатой трансмиссии Репитера

Изготовление индикаторных дисков Репитера

Общий вид индикаторных дисков показан на рис. 2.46.а (большой диск, с грубой шкалой считывания) и рис. 2.46.б (малый диск, с точной шкалой считывания).

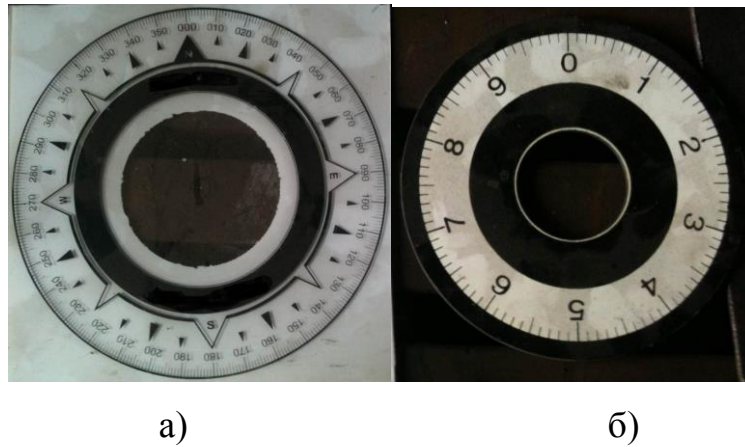


Рисунок 2.46. Большой индикаторный диск с грубой шкалой азимута (а) и малый индикаторный диск с точной шкалой азимута (б)

Изготовление корпуса модуля управления для Репитера гироскопа

Для обеспечения возможности эксплуатации Репитера гироскопа в морских условиях, корпус модуля управления Репитера гироскопа выполнен влагозащищенным из нержавеющей стали. Общий вид корпуса представлен на рис. 2.47.



Рисунок 2.47. Корпус модуля управления для Репитера гироскопа

Изготовление деталей Репитера и его полной сборки

Разработанная и изготовленная внутренняя несущая конструкция Репитера показана на рис. 2.48. Вид его внешнего корпуса и индикаторного механизма

представлен на рис. 2.49. Внешний вид полной сборки Репитера показан на рис. 2.50 (вид сверху на индикатор и вид снизу на корпус Репитера).

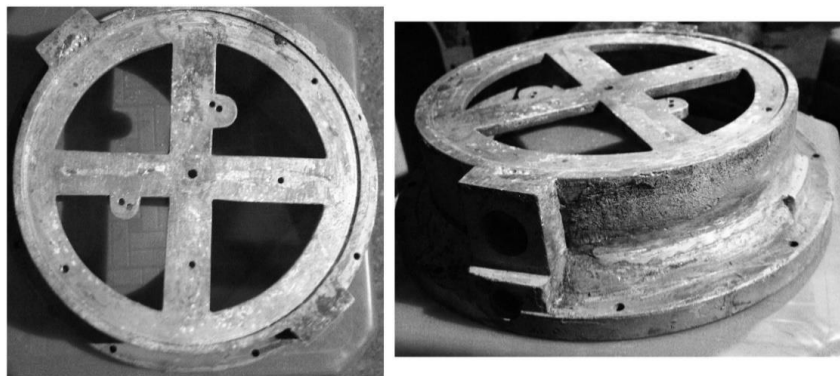


Рисунок 2.48. Вид внутренней несущей конструкции Репитера

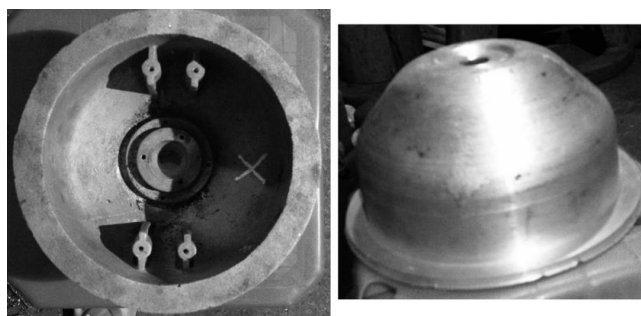


Рисунок 2.49. Вид внешнего корпуса Репитера и индикаторного механизма



а)

б)

Рисунок 2.50. Репитер гирокомпаса; вид полной сборки со стороны индикаторов (а) и вид снизу на корпус Репитера (б)

Основные характеристики 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; влагозащищенность по стандарту IPX6.

2.3. Выводы по главе 2

1. Рассмотрены теоретические основы методов фильтрации Калмана и интервальных оценок, обоснованы возможности применения указанных методов для снижения погрешности показаний выходного сигнала ЦМК из-за влияния шума.

2. Подробно описаны основные характеристики узлов и блоков входящих в состав ЦМК, включая электрические параметры и особенности конструктивного исполнения:

2.1. Разработанный ЦМК имеет следующие основные параметры: 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.

2.2. Микроконтроллер ATMEGA128 ЦМК программируется с использованием соответствующих программ обработки информации и методов фильтрации помех.

2.3. При использовании датчика HMC5883L и модуля NEO-7M при разработке ЦМК и комбинировании с использованием методов фильтрации шума было определено, что ошибка ЦМК составляет около 2 градусов.

2.4. 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; влагозащищенность в соответствии со стандартом IPX6.

2.5. Репитер гироскопа, 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. Его основные параметры: входной сигнал данные в пакетах NMEA0183 в формате стандарта RS485; влагозащищенность по стандарту IPX6.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТРОЙСТВ ЦМКС

3.1 Разработка ПО для ЦМК

Обработка информации и формирование управляющих команд для устройств входящих в состав ЦМК осуществляется в микроконтроллере ATMEGA128. Для программирования микроконтроллера ATMEGA128 используется ПО CodeVisionAVR [65]. Это специализированное программное обеспечение для программирования различных типов микроконтроллеров AVR. Интерфейс ПО CodeVisionAVR показан на рис. 3.1. Программа микроконтроллера ATMEGA128 ЦМК (рис. 3.2) включает подпрограммы:

- Подпрограмма инициализации работы ЦМК;
- Подпрограмма приема и обработки сигналов от датчика HMC5883L;
- Подпрограмма приема и обработки сигналов от модуля NEO-7M ;
- Подпрограмма расчета значения азимута ψ на основе значений α и β ;
- Подпрограмма фильтрации зашумленного значения азимута ψ ;
- Подпрограмма запоминания расчетных данных пакетов NMEA0183 и их передачи другим устройствам корабля.

```

163     }
164 }
165 else
166 {
167     index=0;
168     hmc5883l_measur(xz,yz,az); //update value
169     zk = atan2((float)y,(float)x)* 100 / 3.14159265 + 100;
170     Kk = P_k / (P_k + R);
171     zk = x_k + Kk * (zk - x_k);
172     Pk = (1 - Kk) * P_k;
173 }
174 }
175
176 //=====
177 void send_NMEA(unsigned int angle)
178 {
179     unsigned char header_NMEA[]="HEHD,T"; //checksum 71H
180     unsigned char data_NMEA[4];
181     unsigned char middle_NMEA[]=","; //checksum equal to 52H ^ 71B= 23E
182     unsigned char checksum_data=0;
183     unsigned char i=0;
184     unsigned char hexa[16]="0x30,0x31,0x32,0x33,0x34,0x35,0x36,0x37,0x38,0x39,0x41,0x42,0x43,0x44,0x45,0x46";
185     data_NMEA[0]=angle%10;
186     angle/=10;
187     data_NMEA[2]=angle%10;
188     angle/=10;
189     data_NMEA[1]=angle%10;
190     angle/=10;
191     data_NMEA[3]=angle%10;
192     i="";
193     for (i=0;i<7;putc(header_NMEA[i++]);
194     putchar(data_NMEA[0]+0x30);
195     putchar(data_NMEA[1]+0x30);
196     putchar(data_NMEA[2]+0x30);

```

Рисунок 3.1. ПО CodeVisionAVR

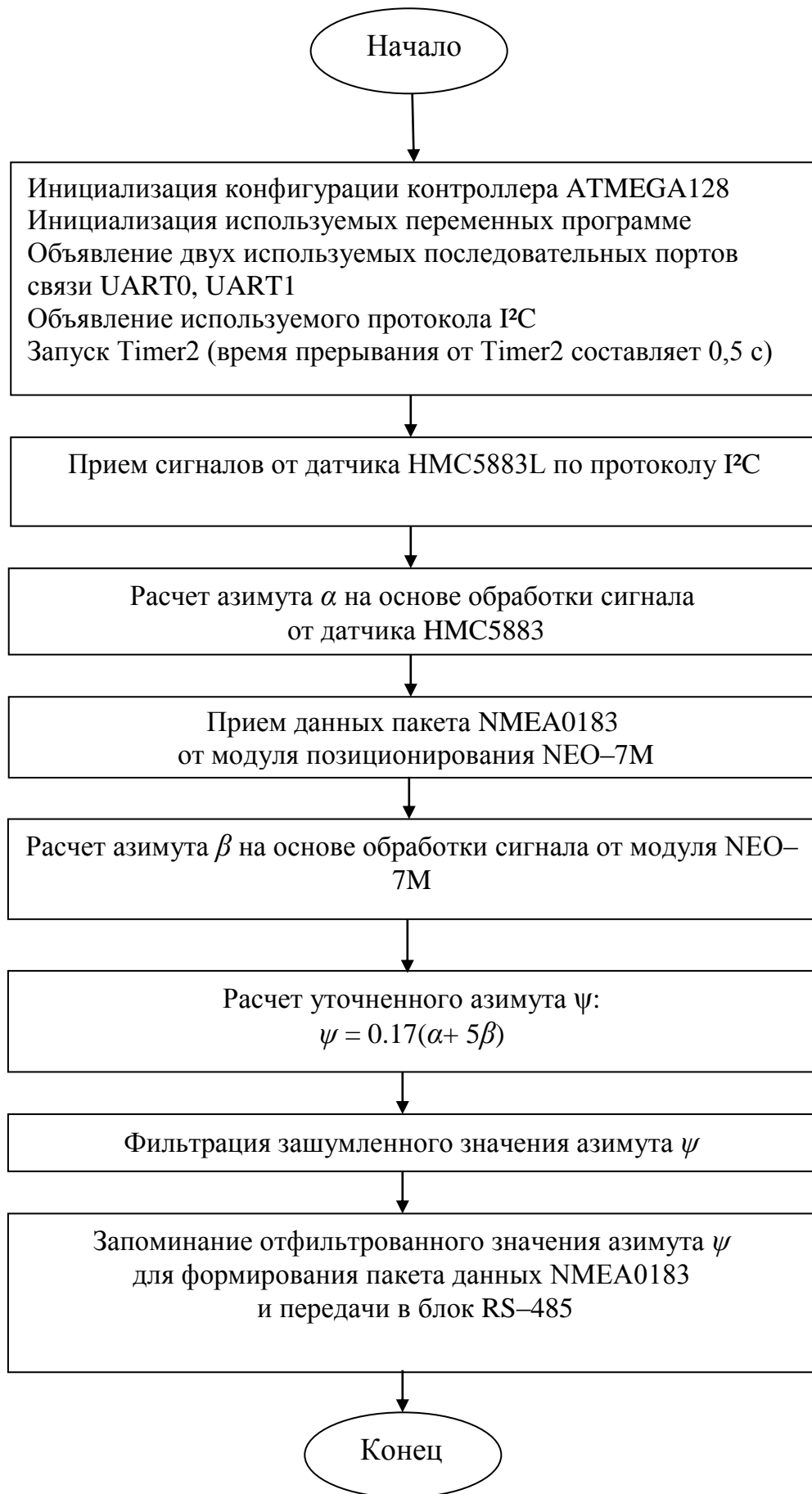


Рисунок 3.2. Блок-схема алгоритмов ЦМК

3.1.1 Подпрограмма инициализации

Первая задача – объявление переменных, используемых в программе:

- переменная α для хранения значения азимута на основе обработки сигнала от датчика HMC5883L;
- переменная β для хранения значения азимута на основе обработки сигнала от модуля NEO–7M;
- переменная ψ – выходное значение, рассчитанное микроконтроллером ATMEGA128 на основе обработки сигналов от датчика HMC5883 и модуля NEO–7M.

Кроме того, объявляются переменные для выполнения различных функций в различных подпрограммах. Внутри алгоритма инициализации мы также объявляем использование 2 последовательных портов (UART0, UART1) для связи с модулем NEO–7M и с блоком RS–485. Последовательный порт UART0 (8 данных, 1 стоп, без проверки четности, скорость передачи в бодах 4800 бит/с) используется для передачи данных компаса NMEA018 на блок RS–485, откуда данные отправляются на устройство отображения. Порт последовательной связи UART1 (8 данных, 1 стоп, без проверки четности, скорость передачи в бодах 9600 бит/с) выполняет прием данных NMEA0183 от модуля NEO–7M. Декларация двух используемых последовательных портов UART0, UART1 выполняется с помощью следующих операторов в ПО CodevisionAvr: UCSR0A=0x00, UCSR0B=0x48, UCSR0C=0x06, UBRR0H=0x00, UBRR0L=0x67, UCSR1A=0x00, UCSR1B=0xD8, UCSR1C=0x06, UBRR1H=0x00, UBRR1L=0x33.

Инициализация протокола I²C для связи с датчиком HMC5883L осуществляется с помощью команды в программе CodeVisionAvr (`#include <i2c.h>`).

Объявление используемого таймера Timer2 для выполнения фильтрации шума и передачи данных компаса NMEA0183 на устройства отображения. Объявление используемого таймера Timer2 производится следующими командами: TCCR2=0x05, TCNT2=0x00, OCR2=0x00.

3.1.2 Подпрограмма приема и обработки сигналов от датчика HMC5883L

Подпрограмма приема и обработки сигналов от датчика HMC5883L (рис 3.3) работает следующим образом:

Микроконтроллер ATMEGA128 считывает значения регистров сигналов с осей x , y , z внутри датчика HMC5883L. Согласно даташиту чипа HMC5883L, значения магнитных датчиков с осей x , y , z чипа содержится в 6 регистрах, адреса которых задаются, соответственно: 0x03, 0x04, 0x05, 0x06, 0x07, 0x08. Здесь адреса 0x03, 0x04 содержат значения младшего байта и старшего байта сигнала с оси x , соответственно. Аналогично, адреса 0x05, 0x06 содержат старшие и младшие байтовые значения оси y , а адреса 0x07, 0x08 содержат младшие и старшие байты оси z [42]

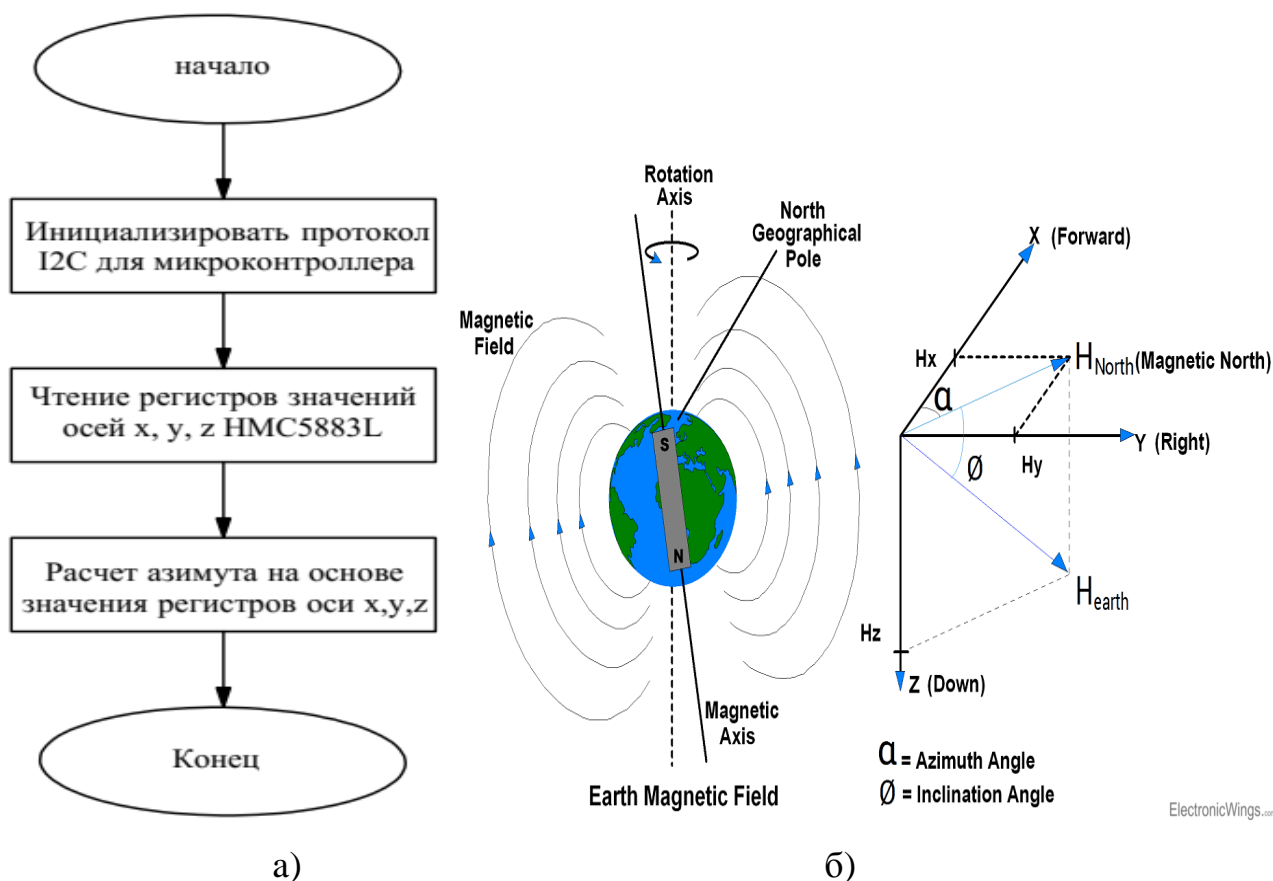


Рисунок 3.3 Алгоритм связи датчика HMC5883L с микроконтроллером ATMEGA128 (а) и векторы магнитного поля по измерительным осям (б)

После считывания значений напряженности магнитного поля (рис.3.3) с датчиков осей x , y и z , микроконтроллер ATMEGA128 переходит к вычислению

значения угла компаса на основе сигналов магнитной напряженности с этих осей. Пусть из регистров чипа HMC5883L были прочитаны два значения магнитного поля с осей x и y . Тогда азимут α компаса рассчитывается по формуле [10] :

$$\alpha = \begin{cases} 90 - \arctan\left(\frac{H_x}{H_y}\right) * \frac{180}{\pi} & \text{if } H_y > 0, \\ 270 - \arctan\left(\frac{H_x}{H_y}\right) * \frac{180}{\pi} & \text{if } H_y < 0, \\ 180 & \text{if } H_y = 0, H_x < 0, \\ 0 & \text{if } H_y = 0, H_x > 0, \end{cases} \quad (3.1)$$

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

3.1.3 Подпрограмма приема и обработки сигналов от модуля NEO–7М

Теоретические основы расчета азимута на основе сигнала спутникового позиционирования

Для повышения точности сигнала ЦМК использовался сигнал от ГНСС в основном по принципу работы, характерному для современных спутниковых компасов [66–68]. В частности, для приема сигналов позиционирования от ГНСС в составе ЦМК использует модуль NEO–7М [45,46]. Последний передает пакеты данных NMEA0183, содержащие долготу и широту корабля. Этот компактный и высокочувствительный модуль поддерживает большинство протоколов GPS и может быть интегрирован в печатную плату. Во время теста антенна модуля NEO–7М закреплена в одной точке корабля. Общий вид модуля показан на рис.3.4

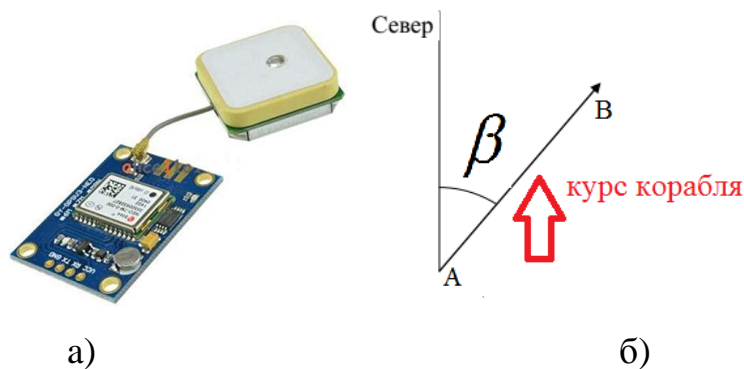


Рисунок 3.4. Модуль позиционирования NEO–7М (а) и азимут β – направление

движения корабля (б)

Функция расчета азимута на основе сигнала ГНСС работает только в случае движения судна (в случае использования только одной антенны ГНСС). Предположим, что корабль движется из положения А в положение В (рис.3.5). Направление β движения судна определяется по следующей формуле [69, 70]:

$$\beta = a \tan 2(\Delta lon, \Delta lat), \quad (3.2)$$

Здесь β – направление движения судна относительно направления на Север; а компоненты Δlat и Δlon рассчитываются по формулам

$$\Delta lat = \ln \frac{\tan(latB / 2 + \pi / 4)}{\tan(latA / 2 + \pi / 4)}, \quad (3.3)$$

$$\Delta lon = abs(lonA - lonB). \quad (3.4)$$

В выражениях (3.3) и (3.4) величины $lonA$, $latA$, $lonB$ и $latB$ представляют собой широту и долготу судна в двух точках А и В.

В процессе перемещения судна модуль NEO–7М непрерывно принимает сигналы от спутников и передает пакеты данных NMEA0183, содержащие долготу и широту судна. Микроконтроллер ATMEGA128 внутри ЦМК запрограммирован на считывание данных NMEA0183 от модуля NEO–7М, их обработку и расчет азимута β по формулам 3.2, 3.3 и 3.4. В случае использования сигналов позиционирования для расчета азимута, для обеспечения точности, расстояние $AB > 4$ м [20–22].

Подпрограмма приема и обработки сигналов от модуля NEO–7М

Во время работы микроконтроллер ATMEGA128 непрерывно принимает пакеты данных NMEA0183 от модуля NEO–7М в следующем виде [46]:

$\$GNRMC,hhmmss.sss,A,GGMM.MMMM,P,gggmm.mmmm,J,x.x,u.u,ddmму,,v^*$
 $hh<CR><LF>$. В этом пакете, символы «GGMM.MMMM» и «gggmm.mmmm» представляют собой широту и долготу, полученные из модуля NEO–7М. Алгоритм приема данных NMEA0183 от модуля NEO–7М показан рис. 3.5. Алгоритм включает выполнение следующий операций:

– открытие приемного буфера достаточного размера для размещения самого

длинного массива символов в соответствии со стандартом связи NMEA0183;
здесь объявляются массивы символов $Array_gps[i]$ ($i = 0 \rightarrow 50$);
– строка символов NMEA1083 загружается в буфер;

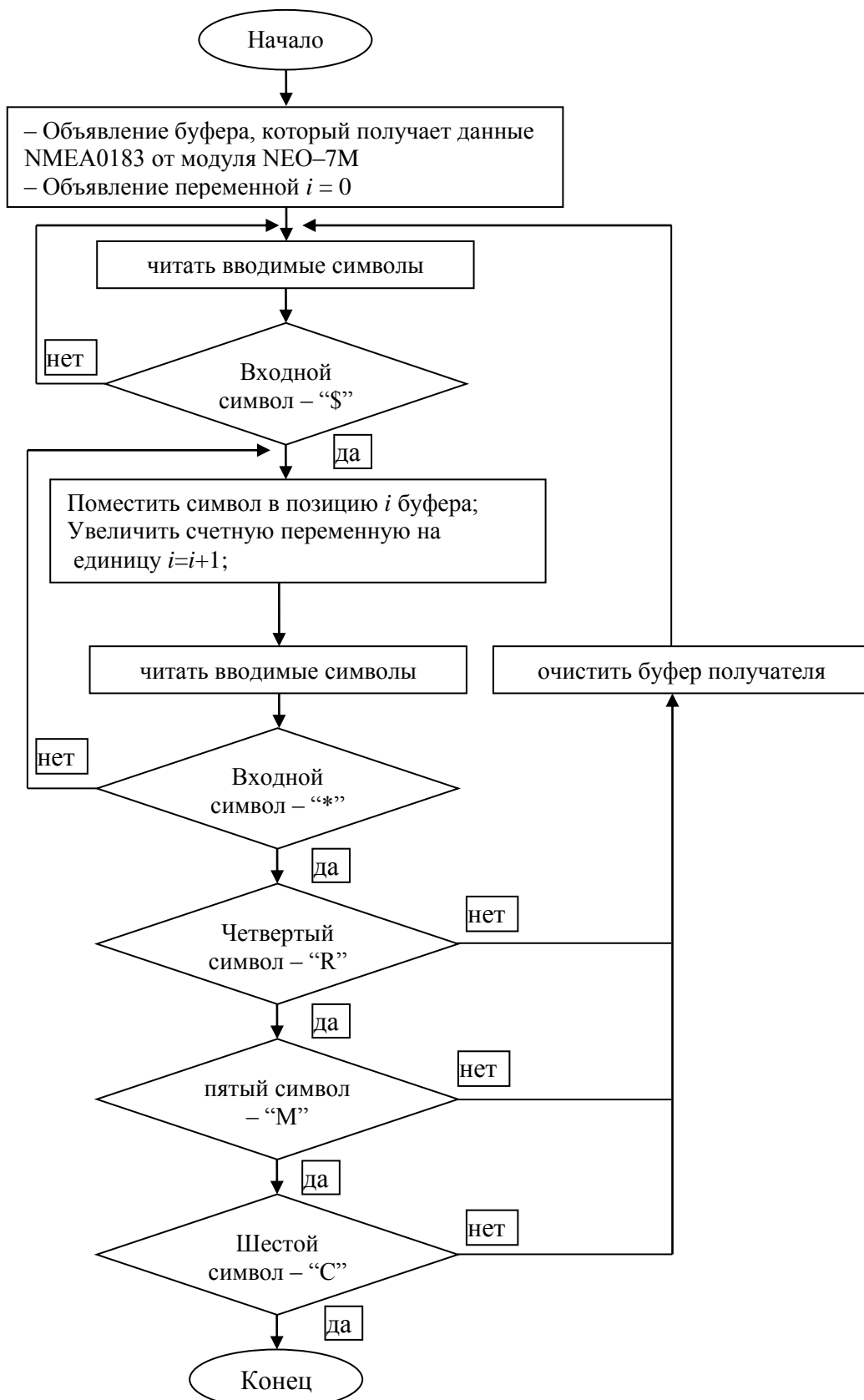


Рисунок 3.5. Алгоритм считывания символов NMEA0183 от модуля NEO-7M

– выполняется проверка завершения загрузки пакет данных NMEA0183;
 – производится переход к обработке загруженных данных по соответствующим инструкциям обработки.

Данные в принимающем буфере являются массивом символьных элементов, первый символ этого массива имеет индекс 0. Первый микроконтроллер считывает каждый входной символ, пока не встретит первый символ «\$», и далее микроконтроллер помещает этот символ «\$» и последующие символы в буфер. Получение сигнала NMEA заканчивается только тогда, когда символ, получаемый в буфере, равен «*». Этот символ предшествует двум символам контрольной суммы. После сбора всех пакетов данных NMEA0183, алгоритм проверяет наличие четвертого, пятого и шестого символов. Если эти три символа равны «R, M, S», соответственно, то принятый пакет NMEA0183 является правильным и может быть передан на обработку. Если в процессе проверки правильности приема хотя бы один символ будет неверным, то приемный буфер очищается и процесс его перезагрузки повторяется.

Структура алгоритма обработки данных и вычисление азимута β на основе данных NMEA0183, полученных с модуля NEO-7M показана на рис. 3.6.

Символы, содержащие информацию о долготе и широте, будут храниться в элементах массива $Array_gps[i](i=20 \rightarrow 25)$ и $Array_gps[i](i=32 \rightarrow 38)$. Текущие значения широты и долготы рассчитываются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} LatA = & Array_gps[20]*10000 + Array_gps[21]*1000 + Array_gps[22]*100 + \\ & Array_gps[23]*10 + Array_gps[25]; \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$LatA = LatA/10;$$

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

$$LonA = LonA/10;$$

После получения текущих значений широты и долготы, алгоритм рассчитывает вариацию (изменение) широты и долготы между текущими и предыдущим моментами времени по формулам:

$$Diff_lon = abs(LonA - LonB), \quad (3.6)$$

$$Diff_lat = \ln \frac{\tan(latB / 2 + 45)}{\tan(latA / 2 + 45)}, \quad (3.7)$$

Искомый азимут β рассчитывается по формуле:

$$\beta = atan2(Diff_lon, Diff_lat). \quad (3.8)$$

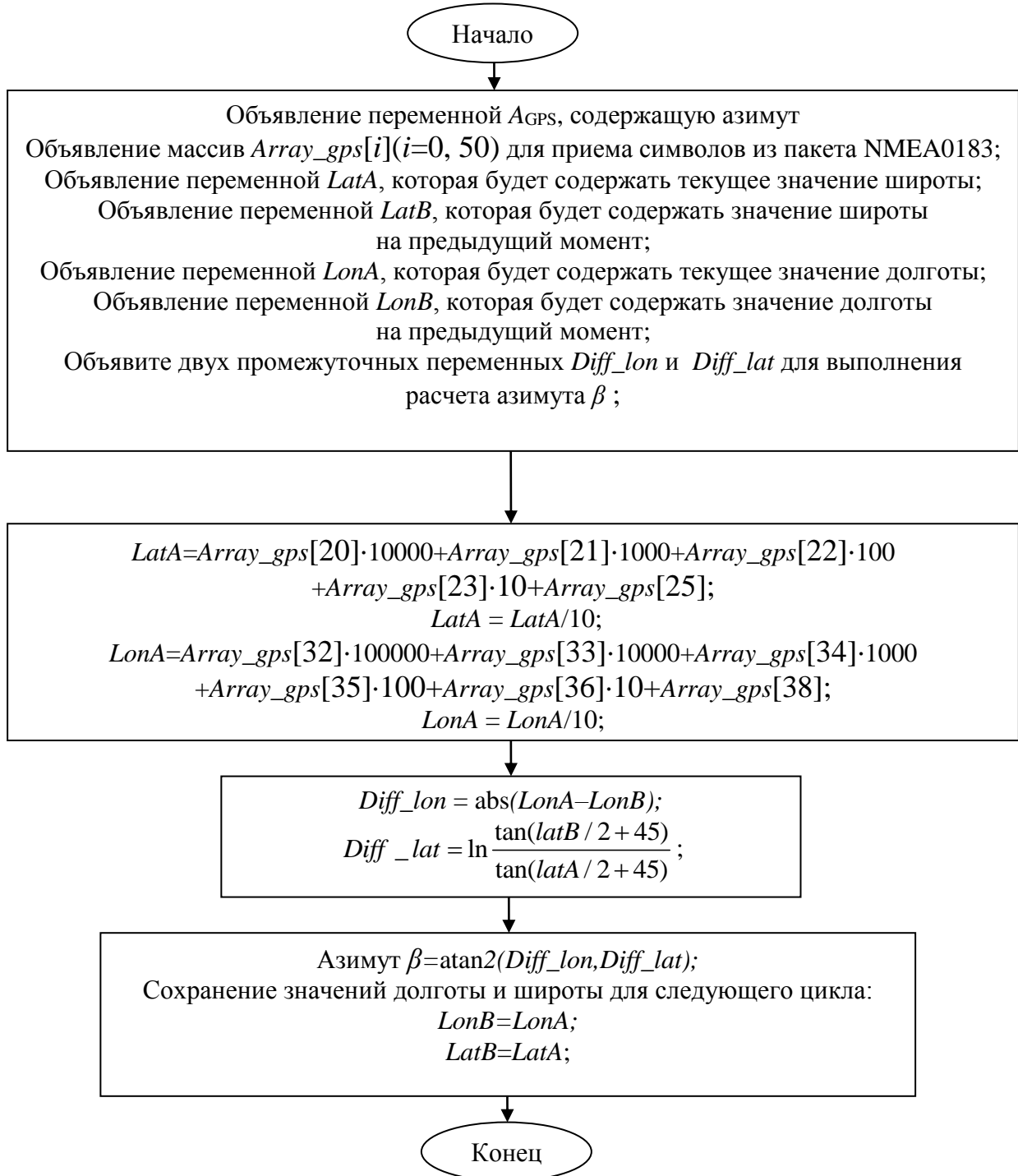


Рисунок 3.6. Алгоритм вычисления азимута β

После вычисления азимута β программа переходит к сохранению текущих значений широты и долготы для использования в следующем цикле программы.

Сохранение двух текущих значений широты и долготы выполняется с помощью следующих двух операторов:

$$LonB=LonA, \quad (3.9)$$

$$LatB=LatA. \quad (3.10)$$

3.1.4 Подпрограмма расчета значения азимута ψ на основе значений α и β

При движении корабля с большой скоростью, обработка сигнала от модуля NEO–7М 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 :

$$\psi = 0.17(\alpha + 5 * \beta) . \quad (3.11)$$

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

3.1.5 Алгоритм Калмана для обработки зашумленного выходного сигнала ЦМК [78, 79, 81, 83, 84]

В разделе 2.1 рассмотрены основы теории фильтра Калмана. В случае использования общих соотношений фильтра Калмана применительно к ЦМК формулы значительно упрощаются. Чтобы записать уравнения Калмана, необходимо указать значение параметров в формулах. Примем переменную $F = 1$, т.е. предсказываемое значение будет равно предыдущему состоянию. В ЦМК отсутствует управляющий вход, поэтому полагаем $u = 0$. Полагаем значение $H = 1$, поскольку измерение является скалярной величиной. Для простоты начальное значения угла полагается $\psi_0 = 0$, а начальное значение оценки погрешности полагается $P = 0$. Принимается значение параметра $Q = 0.03$. Это дает большую гибкость в настройке фильтра. Поскольку в ЦМК управляющих воздействий нет, принимается $B = 0$.

Наиболее важным является выбор параметра R фильтра. Если R выбрано

слишком большим, то это уменьшит расчетную скорость сходимости выходного сигнала фильтра (но при этом выходной процесс фильтра получается весьма гладким). И наоборот, если значение параметра R слишком мало, скорость сходимости оценки фильтра будет выше, но выходной сигнал будет менее гладким. Отметим, что угловая скорость поворота корабля относительно невелика. При этом для ЦМК, установленного на судне, было выбрано разумное значение $R = 2$. Расчетные формулы времени и выходного сигнала в реализованном фильтре Калмана для ЦМК приведены в Таблице 3.1

Таблица 3.1. Формулы фильтра Калмана для ЦМК

Предсказание	Корректировка
$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1}$ $P_k^- = P_{k-1} + Q = P_{k-1} + 0.03$	$K_k = \frac{P_k^-}{P_k^- + R} = \frac{P_k^-}{P_k^- + 2}$ $\psi = 0.17(\alpha + 5 * \beta)$ $\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(\psi - \hat{x}_k^-)$ $P_k = (1 - K_k)P_k^-$

Сруктура алгоритма фильтра Калмана для микроконтроллера ATMEGA128 показана на рис. 3.7. «Алгоритм состоит из двух повторяющихся фаз: предсказание и корректировка» [32]. Первая задача при запуске алгоритма – объявить и присвоить начальные значения переменным следующим образом: $angle=0$, $next=0$, $Index=0$, $Pk=0$, $P_k=0$, $Q=0.003$, $Kk=0$, $xk=0$, $x_k=0$, $\psi=0$, $\alpha=0$, $\beta=0$, $R=2$. 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.

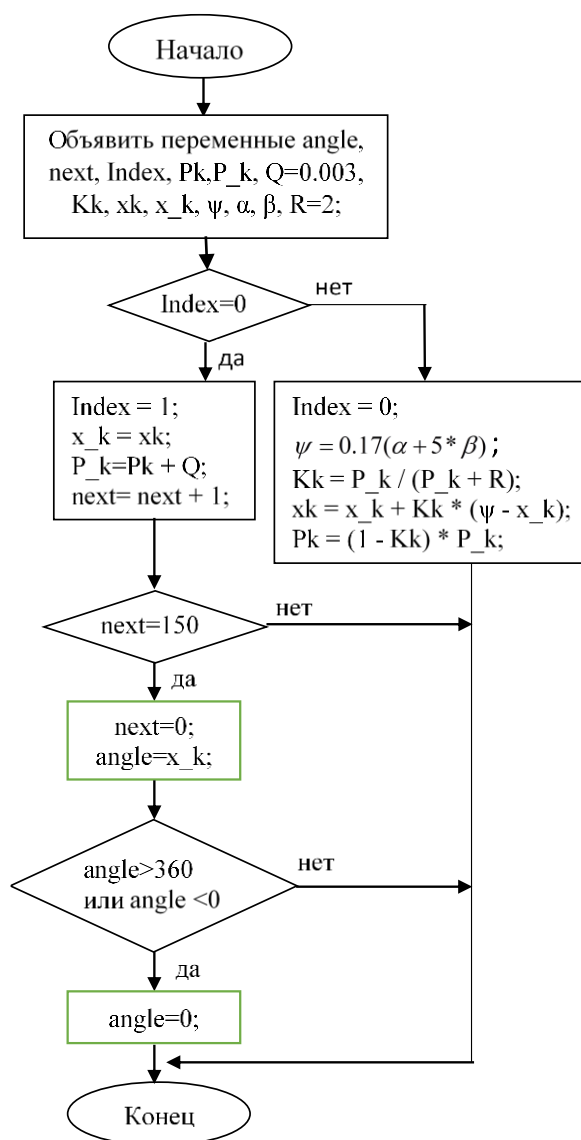


Рисунок 3.7. Алгоритм фильтра Калмана для микроконтроллера ATMEGA128

Результаты моделирования фильтра Калмана на Matlab показаны на рис.3.8. В процессе моделирования фильтруемые значения азимута создаются суммой значения реального азимута (10 градусов) и случайного шума. Красная линия представляет выходное значение фильтра. 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 Pk (предсказание ошибки) характеризует скорость отклика фильтра. Согласно результатам на рис. 10, после 80 измерений Pk сходится к значению 0.01.

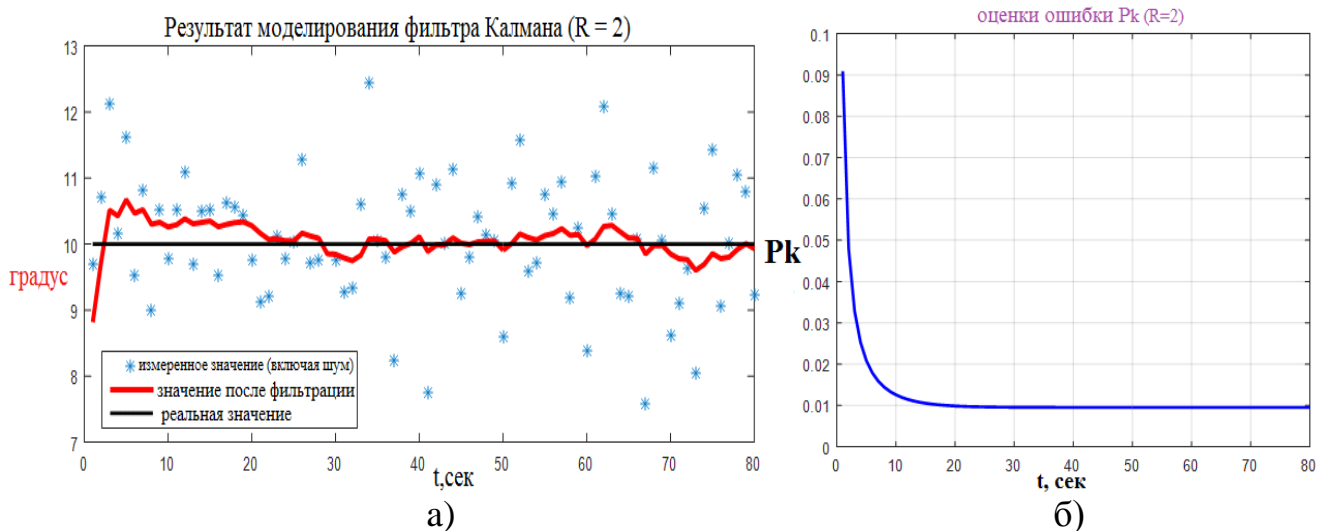


Рисунок 3.8. Результаты моделирования фильтра Калмана (а) и коэффициента P_k на Matlab (в случае коэффициент $R = 2$) (б)

3.1.6 Алгоритм фильтрации с применением интервального подхода для микроконтроллера ATMEGA128 внутри ЦМК

Алгоритм фильтрации с применением интервального подхода для микроконтроллера ATMEGA128 внутри ЦМК показан на рис.3.9 Чтобы выполнить фильтрацию методом интервального подхода, программа использует 10 значений $\psi[i](i=0 \rightarrow 10)$ полученных за 10 раз обработки сигналов от датчиков HMC5883 и NEO-7M. 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 3.12

$$\psi_T = 0.5 * (\psi_{max} + \psi_{min}); \quad (3.12)$$

а искомая оценка её точности вычисляется как

$$d\psi = \psi_{max} - \psi_{min} \quad (3.13)$$

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”.

Результаты интервальной и регрессионной фильтрации реальных процессов

азимута и угловой скорости поворота корабля представлены в Главе 4.

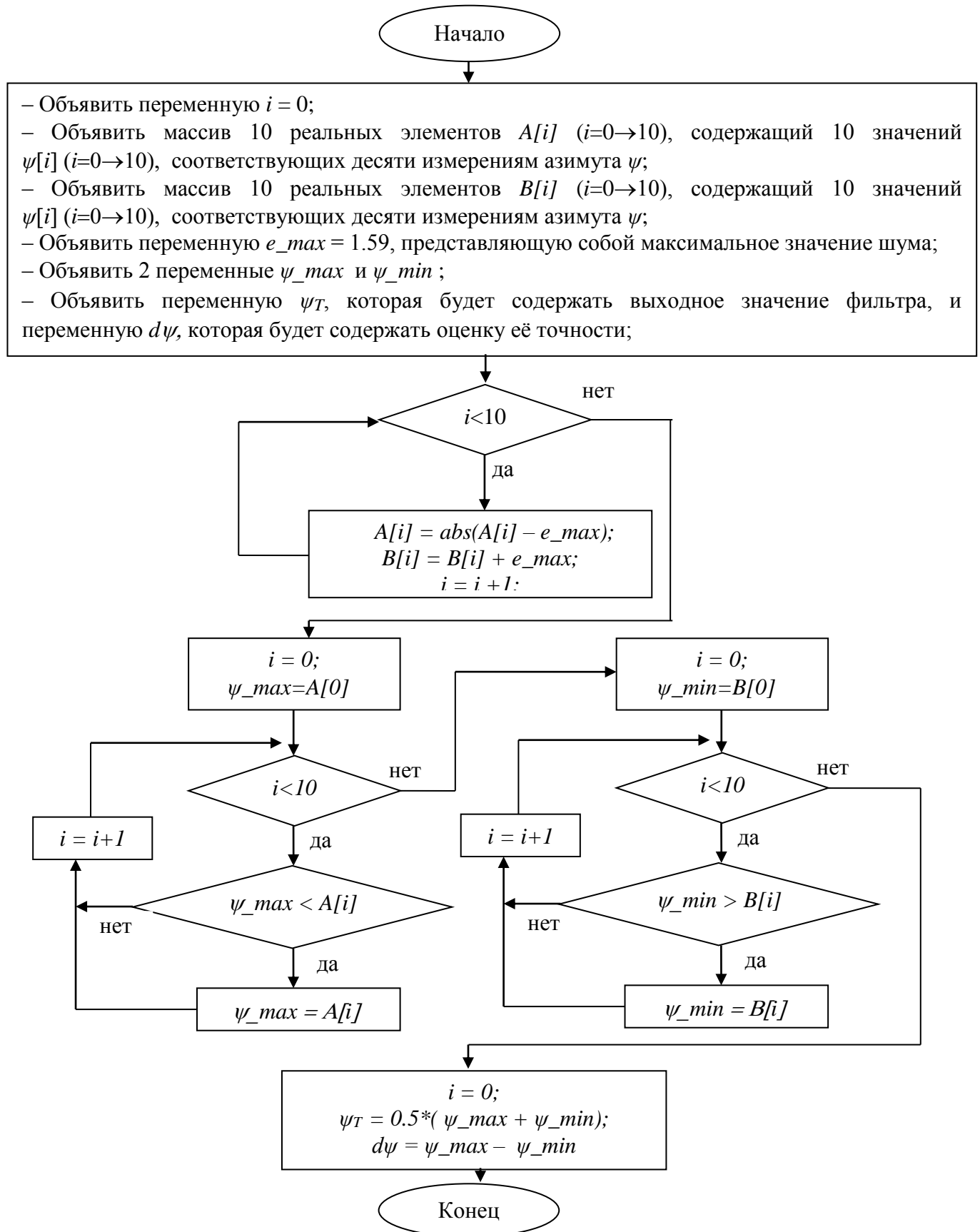


Рисунок 3.9. Алгоритм фильтрации с применением интервального подхода для микроконтроллера ATMEGA128 внутри ЦМК

3.2 Разработка ПО для цифрового устройства отображения

Структура алгоритма для цифрового устройства отображения приведена на рис. 3.10.

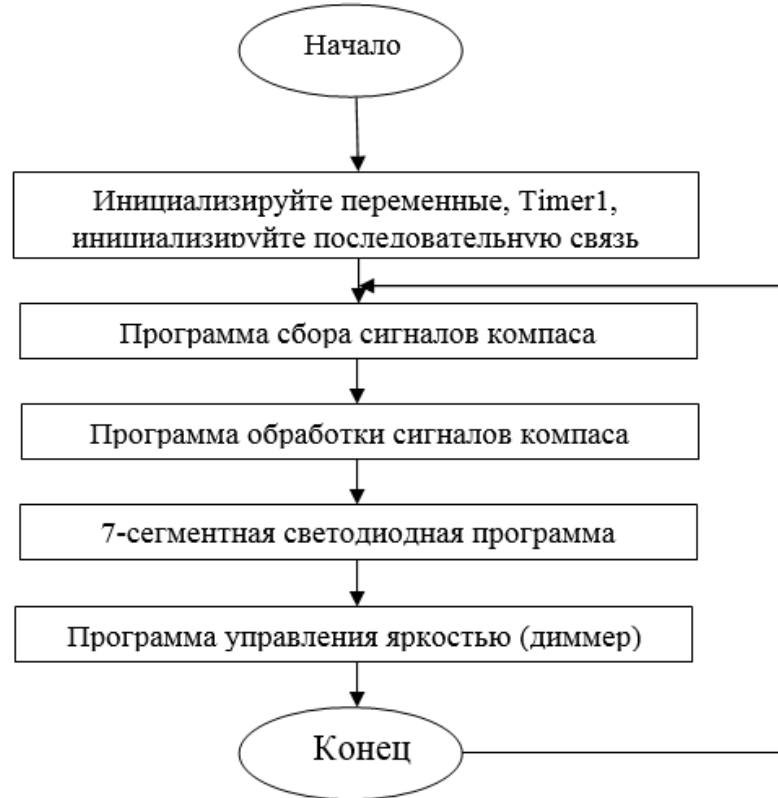


Рисунок 3.10. Алгоритм для цифрового устройства отображения

Первым шагом основного алгоритма является первоначальная инициализация. При этом выполняются:

- объявление используемых портов ввода и вывода информации;
- объявление используемой последовательной связи UART для приема сигналов NMEA0183 от ЦМК;
- объявление таймера Timer1 с режимом прерывания для обслуживания светодиодных индикаторов;
- настройка режима яркости для 7-полосных светодиодов.

После завершения первоначального объявления следующая программа получит и обработает сигналы от ЦМК.

Сигнал NMEA 0183, полученный из ЦМК, будет принят и обработан. Программа обработки данных выполнит алгоритм отделения символов ASCII из

пакета данных NMEA0183 и его преобразования в формат данных для показа на восьми 7-барных светодиодах азимута и скорости поворота корабля.

3.2.1 Алгоритм начальной инициализации программы

Инициализация конфигурации для чипа включает в себя: инициализацию блока последовательной связи UART и инициализацию таймера.

Инициализация блока последовательной связи UART. Эта операция выполняется в ПО CodevisionAVR (рис. 3.11), что дает возможность микроконтроллеру ATMEGA16 получать сигнал NMEA1083 от ЦМК. Начальные настройки должны быть совместимы со стандартом связи NMEA1083. Именно: скорость передачи данных 4800, 8 бит данных, 1 стоповый бит, без бита четности.

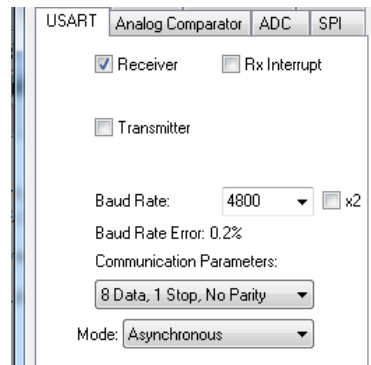


Рисунок 3.11. Инициализация блока последовательной связи UART

Инициализация таймера. В этом процессе (рис.3.12) задаются следующие параметры таймера Timer1: частота генератора 8 МГц, TOP значение FFFF и значение BOTTOM D8EF. Через 0,125 мкс после завершения инициализации такт таймера увеличивается на 1 единицу, начиная с D8EF. По достижении заданного времени FFFF, происходит прерывание от Таймера1.

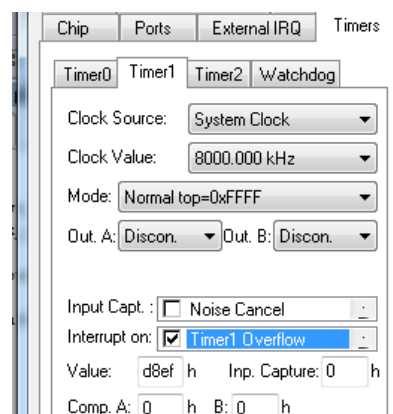


Рисунок 3.12. Инициализация таймера

Целью объявления Timer1 является установка периода времени 0,125 мкс для сканирования восьми 7–сегментных светодиодов.

3.2.2 Алгоритм программы приема сигнала компаса

Пакет данных NMEA0183, полученный из ЦМК, имеет следующую форму: \$HEHDT,XXX.X,T*YY. Здесь пять основных символов XXX.XX – это значения азимута, которые будут отображаться. Структура алгоритма приема сигналов NMEA0183 от ЦМК показана на рис. 3.13.

Алгоритм приема данных NMEA0183 включает в себя операции:

- открытие приемного буфер достаточного размера для размещения самого длинного массива символов в соответствии со стандартом связи NMEA 0183; в разработанной программе объявлялось использование массива символов $A[i]$ ($i = 0 \rightarrow 20$);

- загрузка строки символов NMEA в буфер;

- проверка, является ли строка символов в буфере сигналом компаса.

Принимающий буфер является массивом символьных элементов, первый символ этого массива имеет индекс 0. Микроконтроллер считывает каждый входной символ, пока не встретит первый символ “\$”, микроконтроллер помещает “\$” и последующие символы в приемный буфер, соответственно.

Получение сигнала NMEA заканчивается только тогда, когда символ, полученный в буфере, равен “*”, поскольку этот символ предшествует двум символам контрольной суммы.

После загрузки сигнала NMEA 0183 программа продолжает проверять строку символов в буфере как сигнал от компаса. При этом проверяются по очереди четвертый, пятый и шестой символы "H", "D", "T" в принимающем буфере. В процессе тестирования при первом же неправильном символе принимающий буфер чистится и запускается его повторная загрузка. Программа заканчивается только тогда, когда буфер получает правильный сигнал компаса.

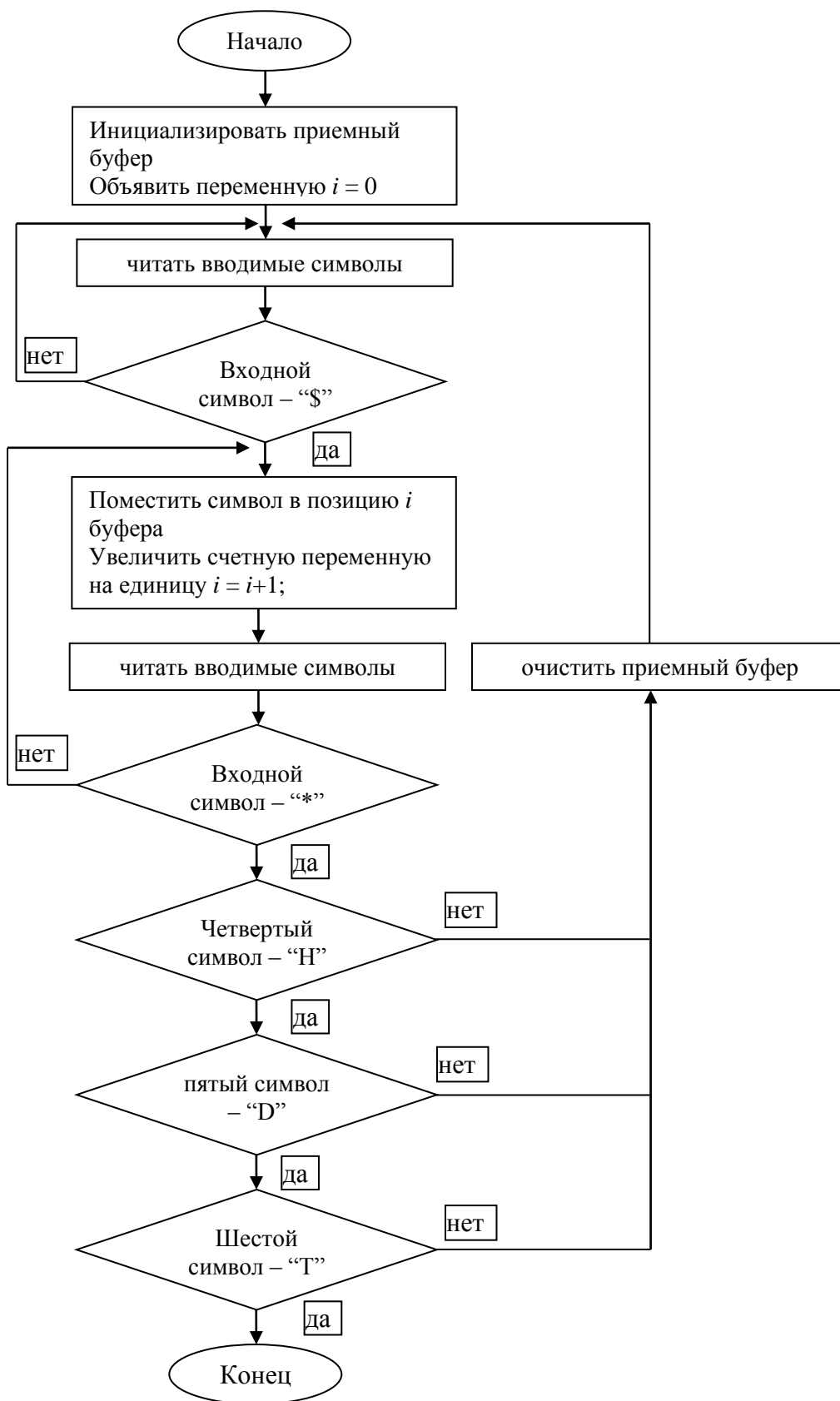


Рисунок 3.13 Алгоритм приема сигналов NMEA0183

3.2.3 Алгоритм обработки сигналов компаса

В алгоритме приема сигнала NMEA0183 символы в пакете NMEA0183

($\$HEHDT,XXX.X,T*YY$) переносятся в массив данных $A[i]$ ($i=0-20$). Поэтому информация $XXX.X$ о азимуте будет размещена в элементах массива $A[i]$ ($i=7-11$). Например, пусть бюллетень NMEA0183, полученный от ЦМК, имеет вид $\$HEHDT,269.1,T*2F$. Тогда $A[7]=2$, $A[8]=6$, $A[9]=9$, $A[10]=''$, $A[11]=1$.

В программе обработки (рис. 3.14) данных NMEA0183 объявляется вещественная переменная (*angle*), которая будет содержать значение азимута.

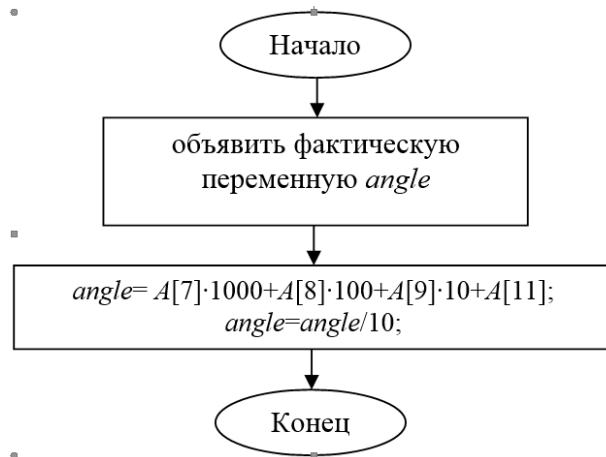


Рисунок 3.14. Алгоритм обработки сигналов компаса

При наличии данных из ЦМК, алгоритм выполняет 2 команды:

$$angle = A[7] * 1000 + A[8] * 100 + A[9] * 10 + A[11], \quad (3.14)$$

$$angle = angle / 10. \quad (3.15)$$

После выполнения этих двух команд значение переменной *angle* будет содержать азимут, полученный из ЦМК.

3.2.4 Алгоритм отображения азимута на четырех 7–сегментных светодиодах

В этом алгоритме (рис. 3.15) сначала объявляется переменная K целочисленного типа и используется таймер для установки времени сканирования 7–сегментных светодиодов. Когда происходит прерывание по таймеру, переменная K увеличивается на 1 единицу. Программа запускается, таймер инициализируется. Он начнет отсчет со времени, которое было выставлено при инициализации для таймера. Когда таймер переполняется, производится переход к запитке 7–сегментного светодиода и одновременно производится выдача соответствующих данных.

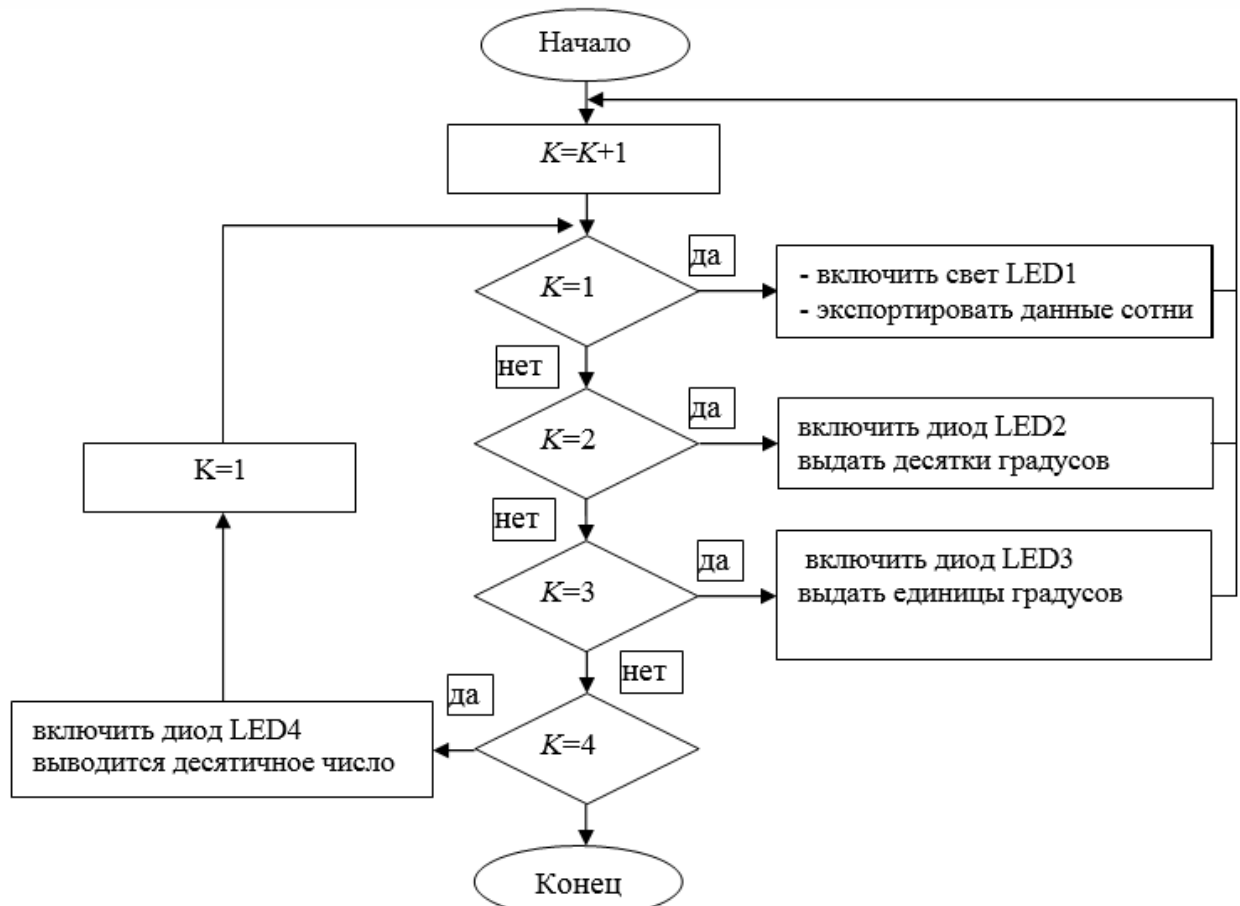


Рисунок 3.15. Алгоритм отображения азимута на четырех 7–сегментных светодиодах

При этом:

- если $K = 1$, то включается светодиод LED1 и отображает сотни градусов;
- если $K = 2$, то включается LED2 и на нем отображаются десятки градусов;
- если $K = 3$, то включается LED3 и отображает единицы градусов;
- если $K = 4$, то включается LED4 и отображает десятичное число после запятой.

Время сканирования каждого 7–сегментного светодиода составляет 0,5 мс, поэтому общее время сканирования для четырех 7–сегментных светодиодов составляет 2мс. Это – малый период времени, достаточный для удобного наблюдения человеческим глазом.

3.2.5 Алгоритм управления яркостью (диммер) светодиодных индикаторов

Регулировка яркости (рис. 3.16) 7–полосных светодиодов осуществляется двумя кнопками (BUTTON–) и (BUTTON+).

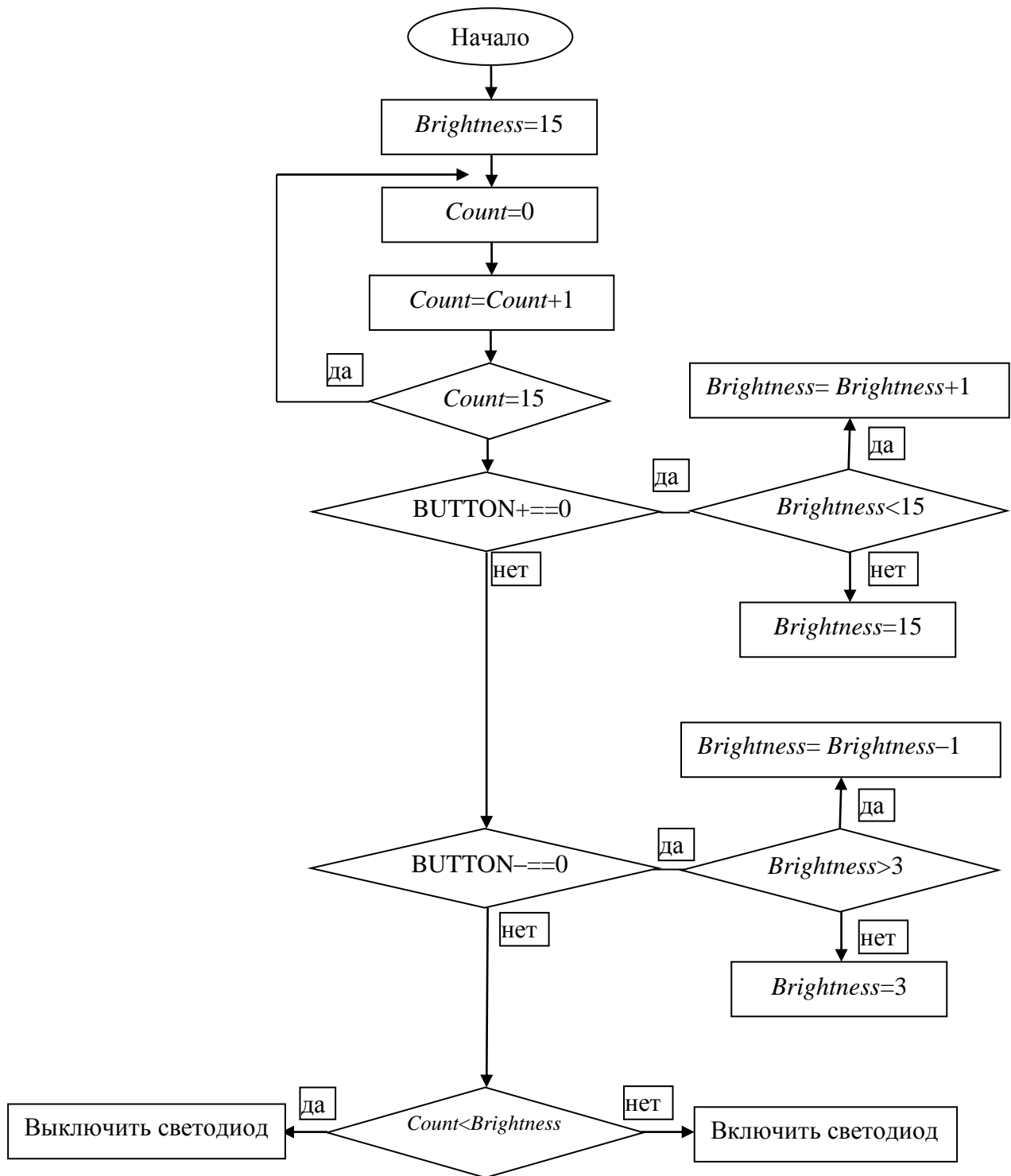


Рисунок 3.16. Алгоритм управления яркостью (диммер) светодиодных индикаторов

Используя таймер1, мы создаем программу, позволяющую регулировать яркость 7-сегментного светодиода путем изменения времени его сканирования. В программе управления яркостью объявляется использование двух переменных *Brightness* и *Count*. Переменная *Brightness* представляет интенсивность света, а

переменная *Count* используется для регулировки яркости.

При запуске программы, переменной *Brightness* присваивается значение 15 (соответствующее максимальному уровню яркости).

Пусть переменная *Brightness* постепенно увеличивается с 0 до 15. При этом проверяется условие $Count < Brightness$, и если оно выполняется, производится дальнейшее увеличение этой переменной. Но когда $Brightness = 15$, то включены все 15 светодиодных циклов. При этом достигается максимальная яркость свечения светодиодов.

При нажатии кнопки (BUTTON–), яркость (*Brightness*) уменьшается на одно значение. Например, пусть $Brightness = 7$, когда $Count = 7$, светодиод будет выключен. Тогда на следующих прерываниях таймера Timer1 такты запитки с 8 до 15 не включаются, и диод будет запитываться в течение только 7 первых циклов.

Увеличение или уменьшение яркости *Brightness* выполняется, соответственно, указанными двумя кнопками BUTTON + и BUTTON–.

Примечание: светодиоды не должны быть полностью темными, поэтому уровень яркости *Brightness* снизу ограничивается: от 3 до 15.

3.2.6 Алгоритм расчета скорости поворота корабля

Для повышения функциональности устройства отображения, оно было спроектировано с отображением не только азимута корабля, но и скорости его поворота. Алгоритм расчета скорости поворота корабля показан на (рис. 3.17). Выполнения этого расчета необходимо использовать два пакета данных NMEA0183 от ЦМК в два последовательных момента времени. Первый алгоритм обработки ожидает, пока не будет получен первый пакет данных NMEA0183. При получении первого пакета NMEA1083 микроконтроллер вычисляет первое значение азимута (*A*). По получению второго пакет данных NMEA0183, производится расчет азимута (*B*) для второго момента времени. В ЦМК такт передачи пакетов составляет 200мс. После вычисления второго угла программа вычисляет вариацию (приращение) (*K*) азимута и рассчитывает скорость поворота корабля $\omega = (K/200) \cdot 1000$ градус/сек. Найденное значение ω

отображается на четырех 7-полосных светодиодах для наблюдения и работы.

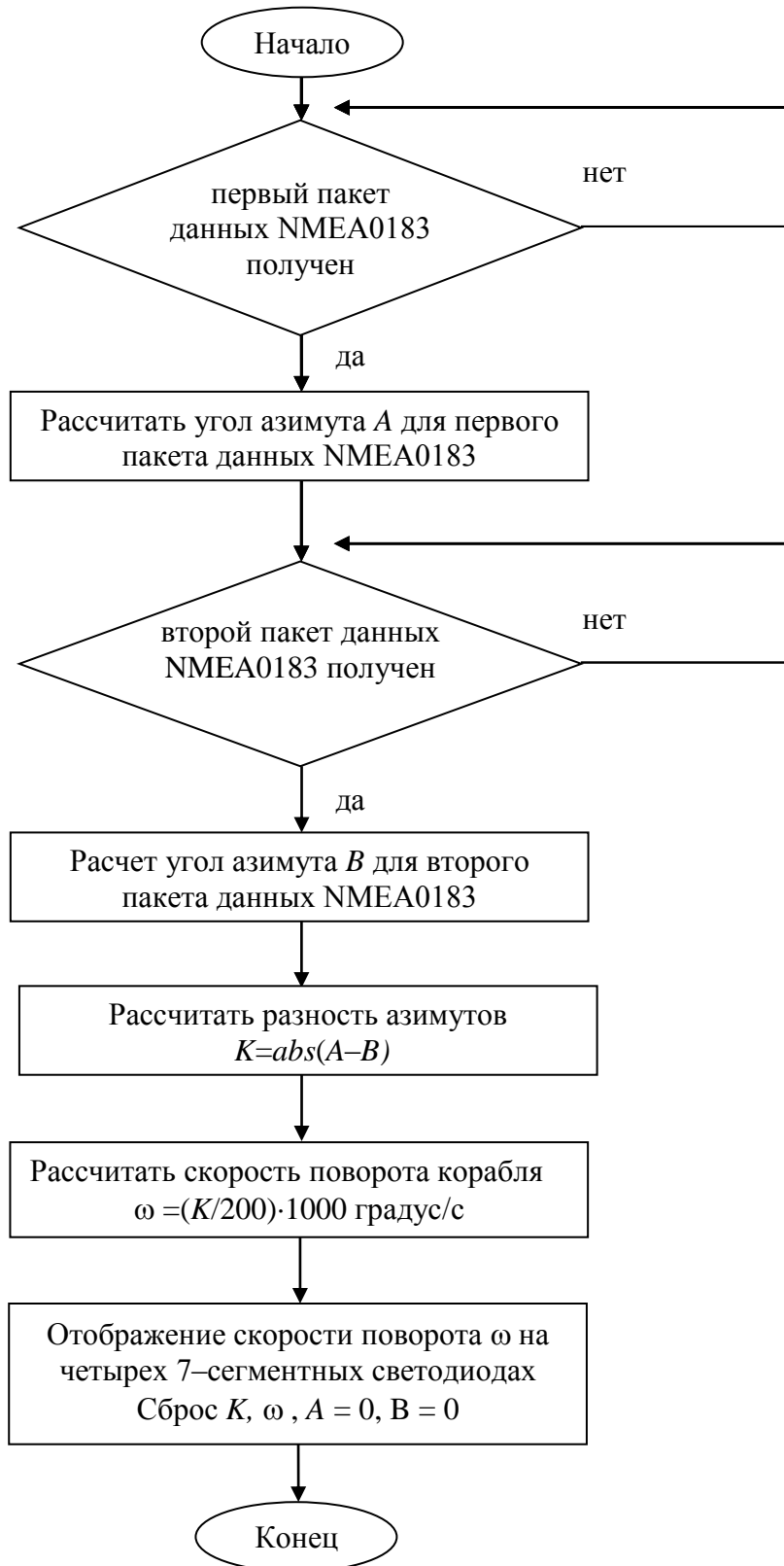


Рисунок 3.17. Алгоритм расчета скорости поворота корабля\

3.3 Разработка ПО для Репитера гироскопа

Алгоритм ПО для репитера гироскопа представлен на рис. 3.18. Программы алгоритма выполняются в 2 этапа: старт и обработка данных для азимутального индикатора.



Рисунок 3.18. Алгоритм основной программы Репитера

Этап 1: Старт. При запуске Репитера необходимо инициализировать некоторые необходимые функции для сохранения азимута компаса и получения сигнала NMEA0183 от ЦМК через канал последовательной связи UART микроконтроллера. Объявляется использование таймера для передачи импульса управления шаговым двигателем. Кроме того, объявляются некоторые промежуточные переменные, необходимые для выполнения вышеуказанных задач.

Программа синхронизации непрерывно выдает импульсы управления шаговым двигателем для выставки указателя в нулевое положение.

Объявление программы обслуживания внешнего прерывания INT1 необходимо для идентификации нулевого положения индикаторной стрелки.

Этап 2: Обработка данных для азимутального индикатора. На этом этапе выполняется: прием каждого пакета данных NMEA0183 в приемный буфер, идентификация, обнаружение и отсоединение символов, содержащих информацию об азимуте, удаление искаженных (неверных) пакетов из буфера.

Из принятого сигнала NMEA0183 программа обработки данных компаса: выделяет символы ASCII пакета, содержащие сигнал компаса, преобразовывает его формат и сохраняет данные азимута в соответствующей переменной.

На основе азимута в предыдущий момент и вновь пришедшей его величины рассчитывается направление вращения шагового двигателя и необходимое количество управляющих импульсов для поворота стрелки индикатора.

По окончании выдачи управляющих импульсов, программа выполняет цикл записи данных компаса. Работа программы заканчивается при прекращении подачи питания на Репитер или при нажатии кнопки сброса микроконтроллера. При этом программа возвращается к выполнению Этапа 1.

3.3.1 Подпрограмма инициализация и объявление переменных

Инициализация жесткого прерывания INT1. Выполняется декларация использования жесткого прерывания INT1 микроконтроллера ATMEGA8, как показано на рис. 3.19. Здесь показан выбор режим прерывания INT1 по обнаружению нарастающей стороны импульса.

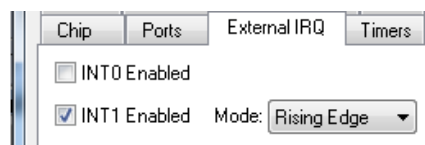


Рисунок 3.19. Объявление использования жесткого прерывания INT1 микроконтроллера ATMEGA8 (в По CodeVisionAvr)

Инициализация протокол последовательной связи UART. Инициализация данного протокола (рис. 3.20) позволяет микроконтроллеру принимать сигнал NMEA0183 от ЦМК. Параметры декларации должны быть совместимы с протоколом NMEA0183: скорость передачи 4800, 8–битные данные, 1 стоповый бит, без контроля четности.

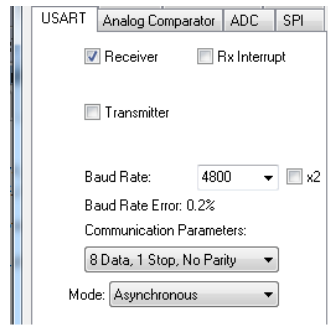


Рисунок 3.20. Инициализация использования протокола последовательной связи UART (в По CodeVisionAvr)

Инициализация таймера (рис. 3.21)

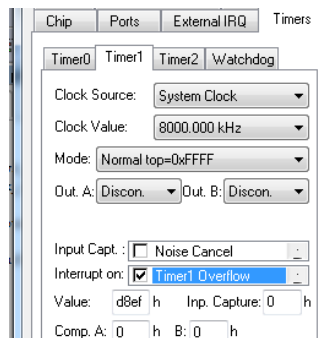


Рисунок 3.21. Инициализация таймера Таймер1

Объявление переменных программы. Перечень объявляемых переменных в программе приведен в Таблице 3.2.

Таблица 3.2. Переменные, используемые в программе

Имя переменной	Смысл
zero	Переменная, используемая для идентификации поворотной стрелки Репитера в положении 0 градусов
i	Эта переменная используется для подсчета и использования на протяжении работы всей программы
re_array	Эта переменная представляет собой массив элементов для приема символов в пакета NMEA0183
azimuth	Сохранить значение азимута после обработки
New_azimuth	Новое значение азимута
Old_azimuth	Предыдущее значение азимута
Delta	Разность между новым и предыдущим значениями азимута
EN	Позволяет стрелке Репитера вращаться или останавливаться
direc	Контролировать направление вращения шагового двигателя (влево или вправо)

3.3.2. Подпрограмма синхронизации

Схема алгоритма подпрограмма синхронизации поворота индикаторной стрелки показана на рис. 3.22.

Подпрограмма синхронизации для точки 0 выполняется при включении питания Репитера или нажатии кнопки RESET. Программа передает передачу управляющие импульсы, так что вращающаяся стрелка Репитера поворачивается против часовой стрелки на отметку 0 градусов из любого ее первоначального положения. Когда вращающаяся стрелка выходит на угол 0 градусов), оптический датчик в цепи обнаружения такого ее положения передает соответствующий импульс на вход жесткого таймера INT1 микроконтроллера. Таким образом микроконтроллер получает информацию о нулевом положении стрелки.

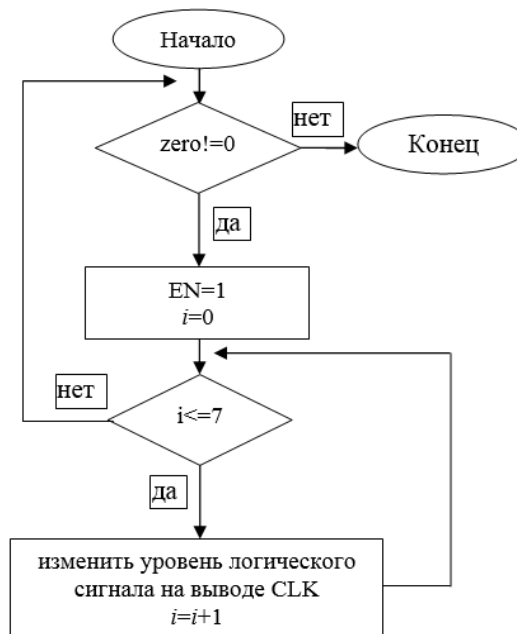


Рисунок 3.22. Алгоритм подпрограммы синхронизации поворота индикаторной стрелки в нулевую точку

3.3.3 Подпрограмма прерывания INT1

Схема алгоритма подпрограмма прерывания INT1 показана на рис. 3.23. Подпрограмма прерывания INT1 информирует центральный процессор о текущем положении вращающейся стрелки на отметке 0 градусов (когда в систему впервые подается питание или при нажатии кнопки RESET). Затем подпрограмма выполняет следующие действия:

- выдает управляющий сигнал для остановки шагового двигателя;
- назначает две переменные с новыми и предыдущим значениями азимута, равными 0 ($New_azimuth = 0$ и $Old_azimuth = 0$);
- отключает жесткое прерывание INT1, поскольку во время управления Репитером индикаторная стрелка может пройти положение 0 градусов; если в этом случае жесткое прерывание INT1 не будет отключено, то центральный блок обработки выполнит этап запуска заново; это может привести к неправильному отображению текущей информации.

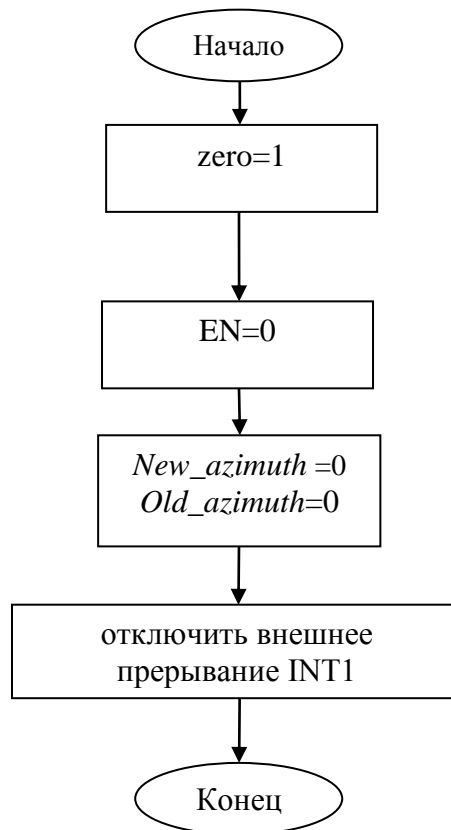


Рисунок 3.23. Алгоритм программы прерывания INT1

3.3.4 Подпрограмма приема сигналов от ЦМК

Пакет данных NMEA0183, полученный из ЦМК, имеет следующий вид: \$HEHDT,XXX.X,T*YY, где 5 основных символов XXX.XX – это значения азимута, которые будут отображаться. Схема алгоритма приема сигналов NMEA0183 от ЦМК показана на рис. 3.24. Алгоритм сбора данных NMEA0183 включает следующие действия:

- объявляет 20–элементный массив данных, содержащий символы пакета данных NMEA0183, полученных из ЦМК $A[i]$ ($i = 0 \rightarrow 20$);

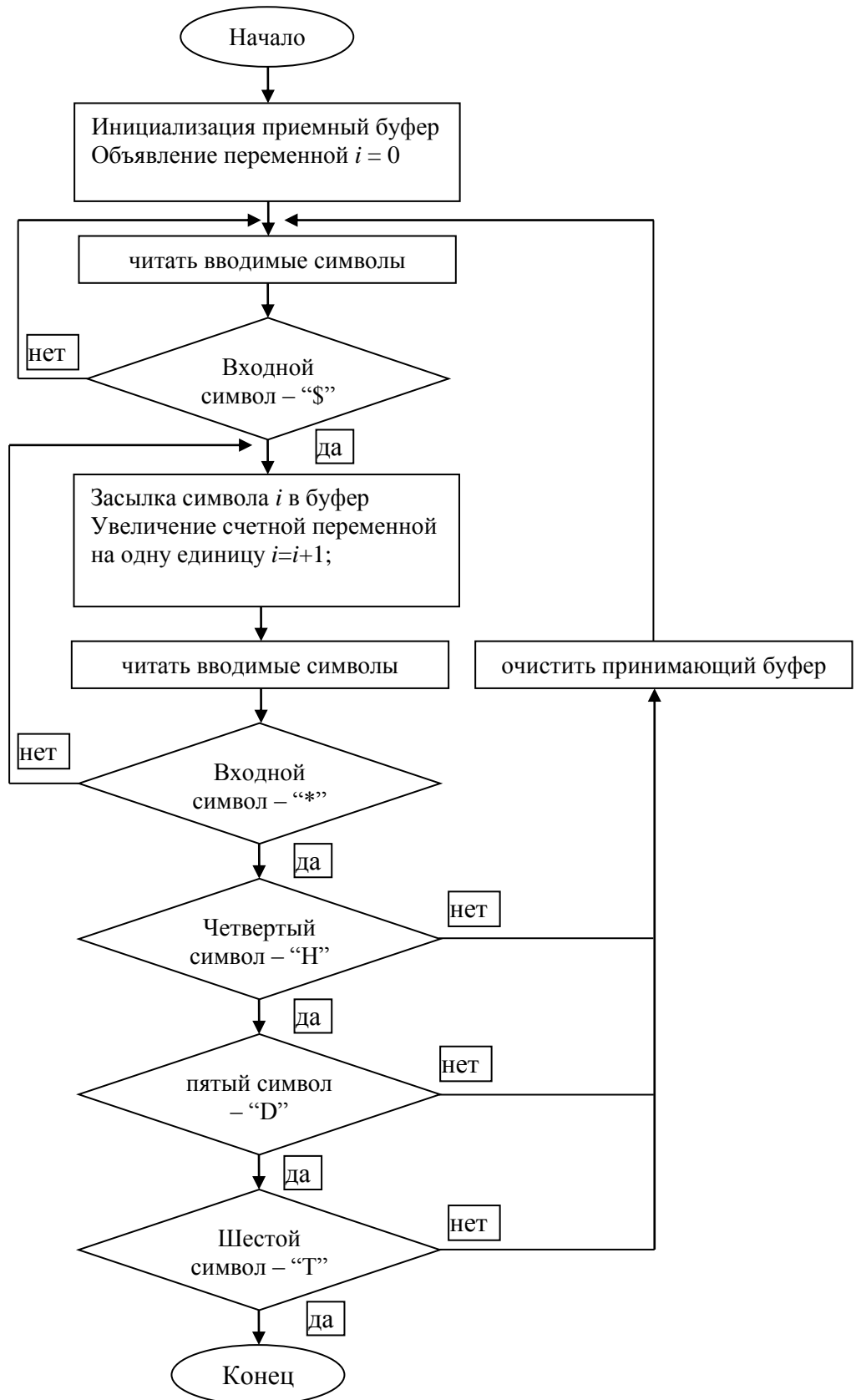


Рисунок 3.24 Алгоритм приема сигналов компаса

- загрузка строку символов NMEA в буфер;
- проверка правильности информации.

Принимающий буфер является массивом символьных элементов, первый символ этого массива имеет индекс 0. Микроконтроллер считывает каждый входной символ, пока не встретит первый символ “\$” и помещает этот символ “\$” и последующие символы в принимающий буфер, соответственно. Прием сигнала NMEA0183 заканчивается, когда очередной принятый символ равен “*”, поскольку этот символ предшествует двум символам контрольной суммы. После загрузки сигнала NMEA0183 программа продолжает проверять строку символов в буфере (является ли принятая информация сигналом компаса), проверяя по очереди четвертый, пятый и шестой символы "H", "D", "T " в принимающем буфере. В процессе тестирования достаточно одного неправильного символа, чтобы принимающий буфер был очищен и запущена его перезагрузка. Программа приема заканчивает работу только тогда, когда буфер получит весь правильный сигнал компаса.

3.3.5 Подпрограмма расчета азимута на основе данных NMEA0183, полученных из ЦМК

Подпрограмма расчета (рис. 3.25), символы в его пакета (\$HENDT,XXX.X,T*YY) переносятся в массив данных $re_array[i]$ ($i=0-20$).

Поэтому информация о азимуте XXX.X будет размещена в элементах массива $re_array[i]$ ($i=7-11$). Пусть, например, бюллетень NMEA0183, полученный от ЦМК, имеет форму \$HENDT,269.1,T*2F. Тогда в массив выполнится запись $re_array[7]=2$, $re_array[8]=6$, $re_array[9]=9$, $re_array[10]=".$ ”, $re_array[11]=1$. В программе обработки данных NMEA0183 объявляется вещественная переменная *azimuth*, которая будет содержать значение азимута. Когда данные из ЦМК приняты, программа выполняет 2 команды:

$$azimuth=re_array[7]*1000+re_array[8]*100+re_array[9]*10+re_array[11], \quad (3.16)$$

$$azimuth=azimuth/10. \quad (3.17)$$

После выполнения этих двух команд значение переменной *azimuth* будет содержать азимут, полученный из ЦМК.

В конце работы этой подпрограммы значение азимута, полученное из ЦМК в настоящее время, сохраняется и одновременно обновляется, чтобы перенести

данные в программу управления шаговым двигателем. Обновление данных выполняется с помощью следующих двух команд:

$$Old_azimuth = New_azimuth, \quad (3.18)$$

$$New_azimuth = azimuth. \quad (3.19)$$

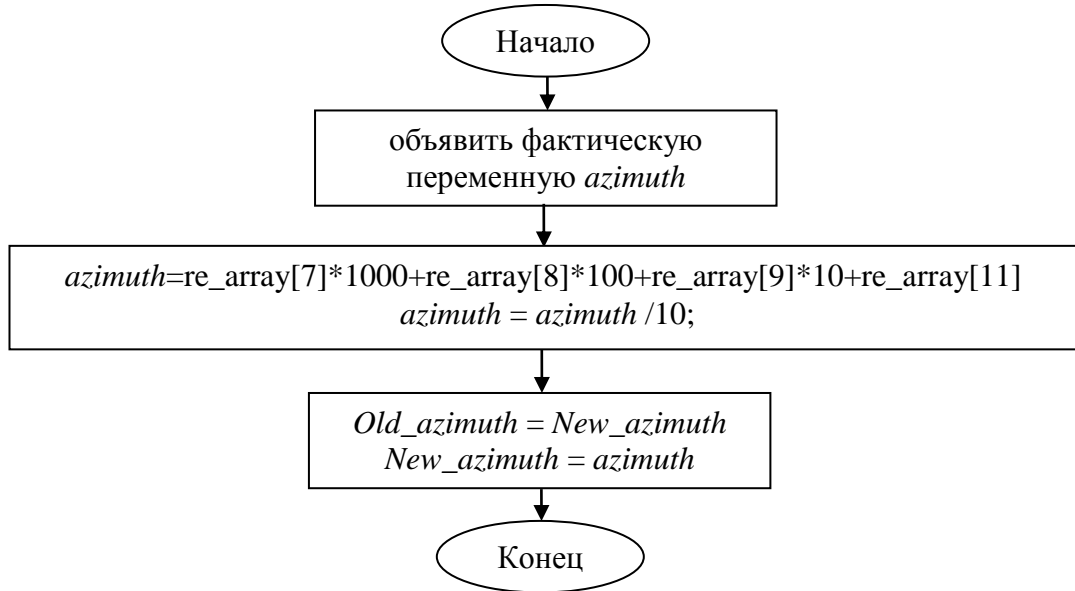


Рис.3.25. Программа приема сигналов азимута

3.3.6 Алгоритм управления шаговым двигателем

Схема данного алгоритма приведена на рис. 3.26. Сначала алгоритм микроконтроллер вычисляет отклонение между текущим азимутом и значением азимута в предыдущие момент. Изменение азимута вычисляется по формуле

$$Delta = New_azimuth - Old_azimuth. \quad (3.20)$$

Это значение $Delta$ затем проверяется:

- если $Delta = 0$, то выдается сигнал останова двигателя ($EN = 0$) и программа завершает работу;
- если $Delta < 0$, то двигатель будет поворачиваться против часовой стрелки (налево);
- если $Delta > 0$, двигатель то двигатель будет поворачиваться по часовой стрелке (направо).

Когда проверка выполнена, микроконтроллер вырабатывает импульсы управления шаговым двигателем. Рабочая переменная i может принимать значения от 1 до $abs(Delta)$. Каждый раз, когда значение i увеличивается на

единицу, микроконтроллер посылает 4 управляющих импульса для вращения шагового двигателя.

Например, пусть $New_azimuth = 3549$, а $Old_azimuth = 3482$. Это соответствует новому значению азимута 354.9 градуса и старому азимуту 348.2 градуса. Изменение азимута составляет $Delta = New_azimuth - Old_azimuth = 3549 - 3482 = 77$. Угол увеличился, поэтому поворот будет осуществляться вправо, количество управляющих импульсов $77 \cdot 4 = 308$.

В конце работы программы микроконтроллер выдает сигнал остановки шагового двигателя.

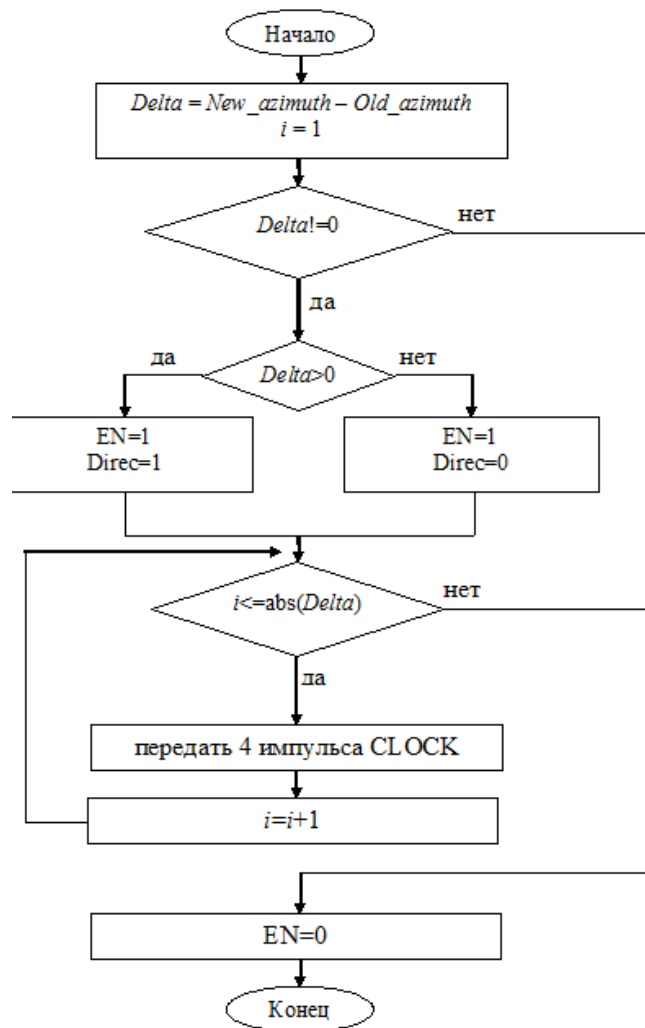


Рис.3.26. Алгоритма генератора импульсовуправления шаговым двигателем

3.4. Выводы по главе 3

В данной главе разработаны и реализованы программные алгоритмы для составных устройств ЦМКС. ПО разработано в среде CodeVisionAvr2.05 от

фирмы HP InfoTech SRL на языке высокого уровня C/C++:

3.1. Разработаны алгоритм и программное обеспечение фильтрации шума показаной ЦМК на основе применения метода фильтра Калмана.

3.2. Разработаны алгоритм и программное обеспечение фильтрации шума показаной ЦМК на основе реализации метода интервальных оценок и регрессионного анализа.

3.3. Предусмотрено использованием ПО и алгоритмов для приема и обработки сигналов от двух магнитных датчиков и системы позиционирования GPS/ГЛОНАСС.

3.4. Разработано ПО цифрового устройства отображения азимута и скорости поворота судна на восьми семисегментных светодиодах. Разработаны алгоритмы сбора, обработки и управления информацией Репитер гирокомпаса.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И ЭСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЦМКС

4.1 Результаты изготовления ЦМКС

Оборудование в составе ЦМКС изготовлено в соответствии с техническими стандартами и способно долгосрочно работать на море в неблагоприятных погодных условиях. Исследовательский стенд с реальной ЦМКС показан на рис. 4.1.



Рисунок 4.1. Исследовательский стенд с реальной ЦМКС

Основные параметры ЦМКС:

- входное напряжение 24 В;
- потребляемый ток источника питания 2А;
- потребляемая мощность: 48Вт.

- выходные данные для связи с другими системами на борту по стандарту NMEA0183;
- Максимальная ошибка вывода ЦМК : 2 градуса
- стандарты водонепроницаемости Ipx6.

Реальные образцы ЦМКС были подготовлены и прошли практические испытания на судах во Вьетнаме. Результаты испытаний представлены соответствующими Протоколами Технических служб Вьетнама (Приложение).

Экспериментальные результаты (Приложение, Экспериментальные данные) показывают, что изготовленная система готова к использованию на судах с такими же функциями, которые характерны для современных электронных компасных систем.

4.2 Установка и подключение устройств ЦМКС

Для минимизации магнитных помех, вызванных металлическими конструкциями судна, ЦМК устанавливаются на стойке на расстоянии не менее 3 м от пола корабля.

Антенна ГНСС ЦМКС устанавливалась на рубке корабля.

Цифровые устройства отображения были установлены в помещении для удобного наблюдения, а также для защиты циферблатов от таких климатических факторов, как дождь, жара, холод и т. п., которые могут оказать вредные влияния на качество работы устройств.

Репитер гирокомпаса, изготовленный во влагонепроницаемом корпусе, был установлен вне палубы для удобного наблюдения. Это позволяет увидеть направление движения судна, не заходя в кабину управления.

Обеспечена возможность подключения ЦМК напрямую к другим устройствам в системе. Однако, для повышения надежности был введен буфер сигналов NMEA0183. Данный буфер используется для фильтрации помех в измерительной информации и усиления сигнала для присоединения ЦМК к другим приборам и оборудованию судна. Например: системе привода, системе регистрации круизных данных и т. д. Схема подключения репитера гирокомпаса к

блоку управления устройства показана на рис. 4.2. Схема подключения ЦМКС приведена на рис. 4.3.



Рисунок 4.2. Схема подключения репитера гироскопа к блоку управления устройства

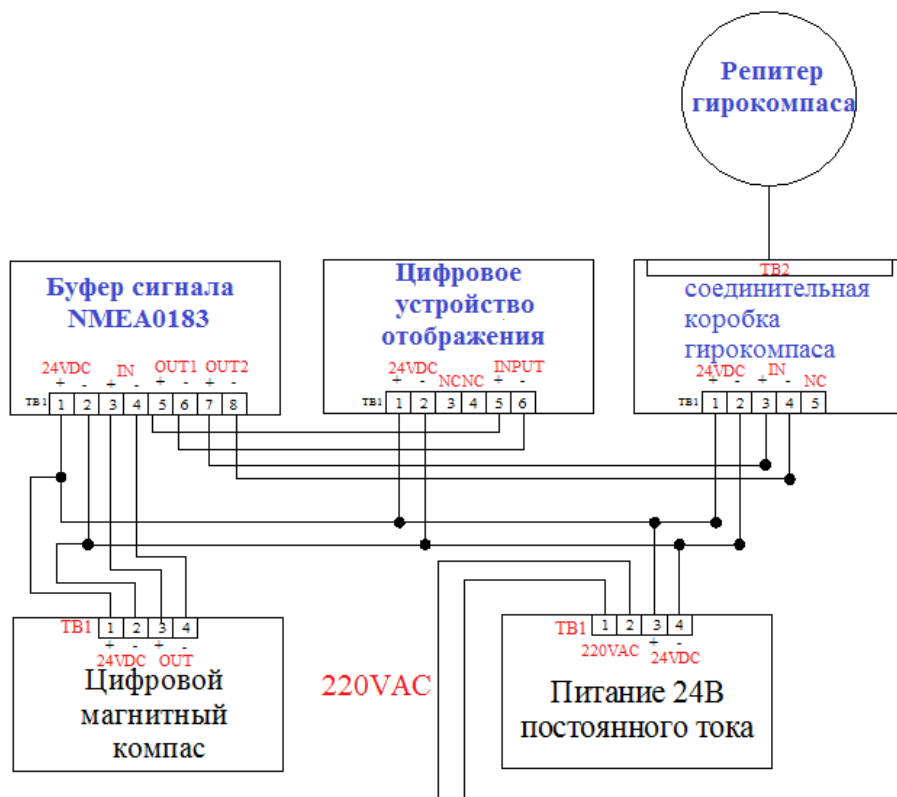


Рисунок 4.3. Схема подключения ЦМКС

4.3 Тестирование ЦМК

ЦМК был протестирован двумя вьетнамскими компаниями «Maritime trading and service technology Co.,LTD» и «Thao Linh DMTCO.,LTD». Место проведения испытания – корабль «M/V SAI GON FORTUNE» [71–73]. Протоколы о проведении тестирования ЦМКС представлены в Приложении к данной диссертации. В настоящем разделе диссертации проведено конкретное описание результатов одного из испытаний, зафиксированных в данных протоколах.

4.3.1 Подготовка к тестированию и методы испытаний

Подготовка к тестированию включает следующие шаги:

- 1) обеспечить 24В постоянного тока для питания системы;
- 2) повернуть ЦМК так, чтобы исходный угол азимута ЦМК был равен исходному значению азимута стандартного электрического компаса;
- 3) подключить ЦМК к компьютеру с установленным программным обеспечением для мониторинга.

Для испытания ЦМК было создано на ПО С# специальное приложение (Рис.4.4), предназначенное для отображения характерных линий ЦМК и стандартного гирокомпаса корабля в виде графика с течением времени. Процесс испытания включает следующие шаги:

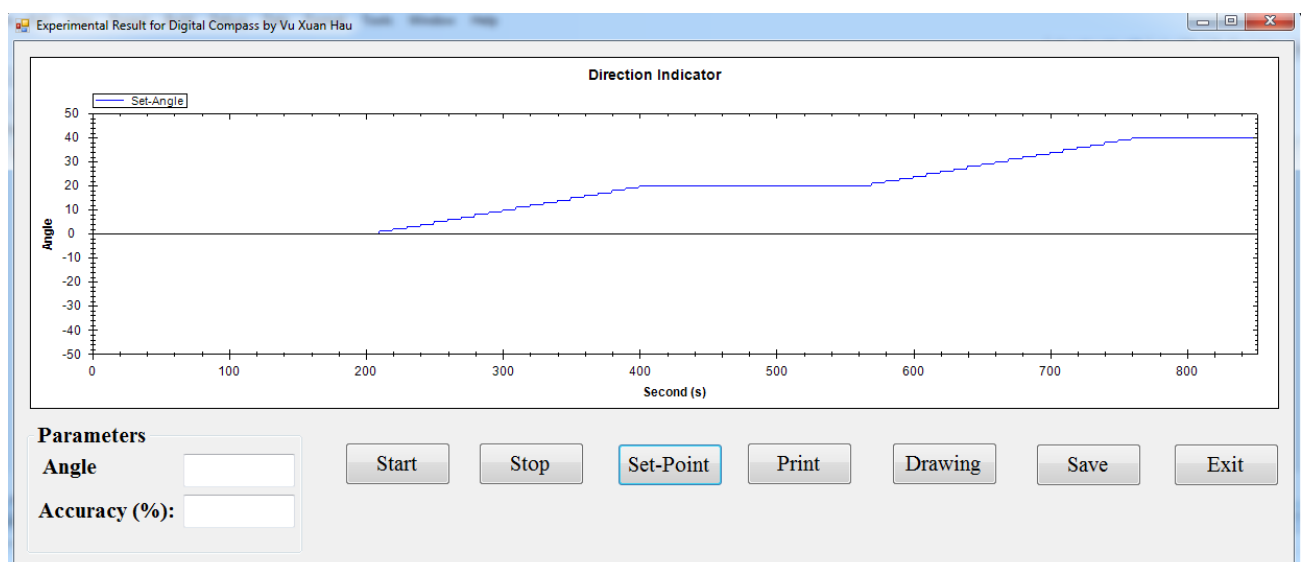


Рисунок 4.4. Интерфейс ПО для тестирования ЦМК

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 гирокомпаса корабля, отражающая желаемое значение азимута (ближайшее к истинному).

4.3.2 Результаты испытания ЦМК

Экспериментальные результаты, когда ЦМК использует только датчик HMC5883L

ЦМК был протестирован в двух ситуациях: при повороте корабля вправо и поворот корабля влево.

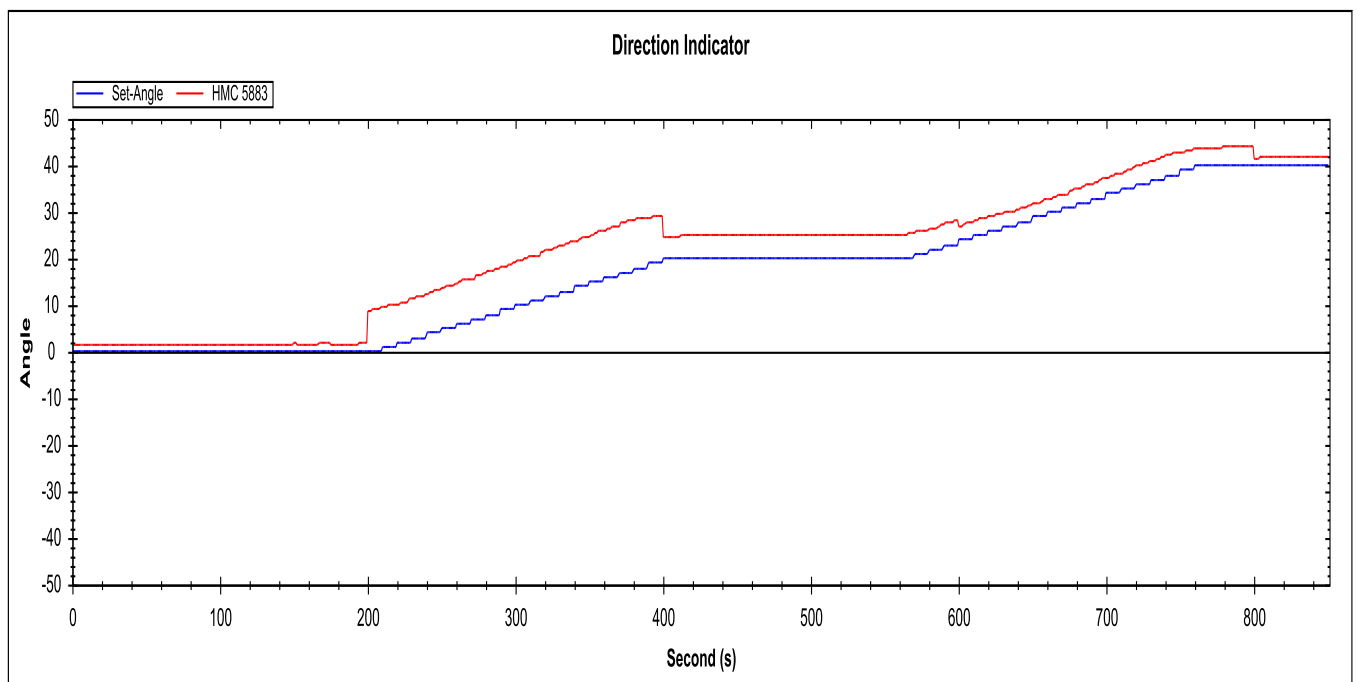


Рисунок 4.5. Результаты теста, когда ЦМК использует только HMC5883L и не использует фильтр Калмана (поворот корабля вправо)

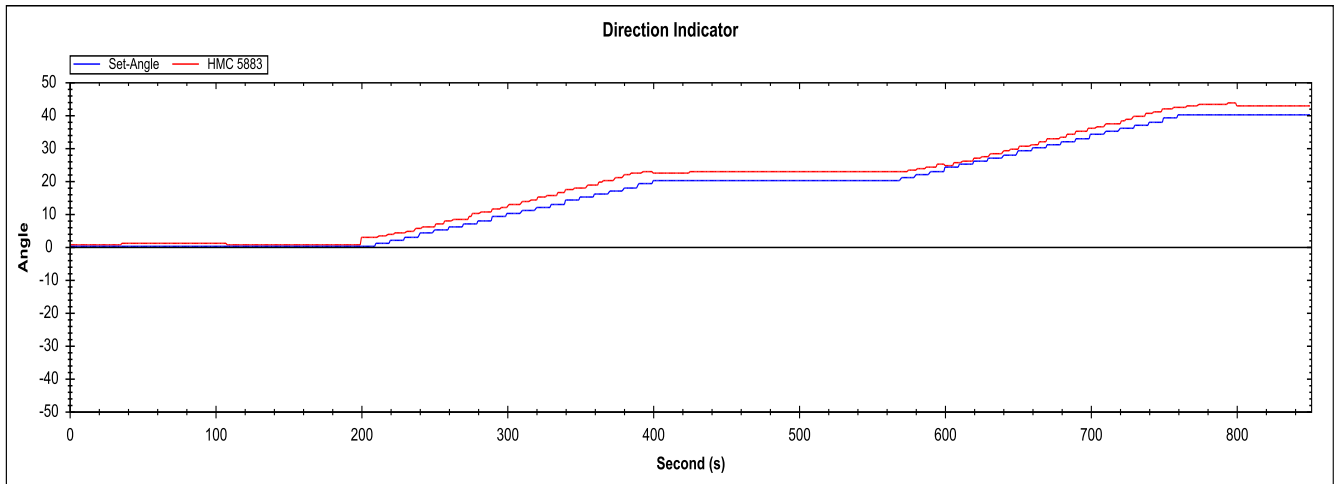


Рисунок 4.6. Результаты теста, когда ЦМК использует только НМС5883L и использует фильтр Калмана (поворот корабля вправо)

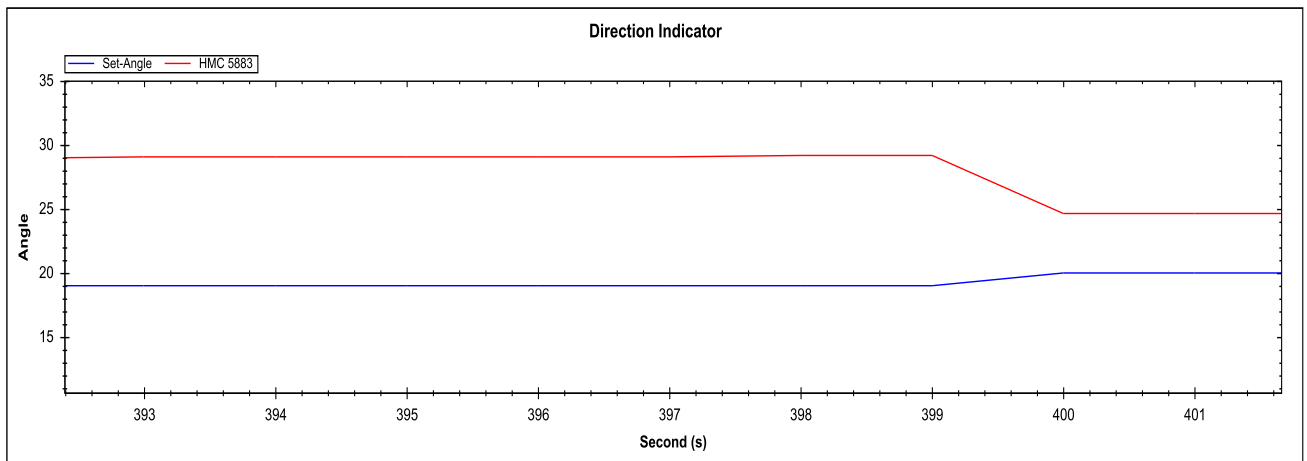


Рисунок 4.7. График, показывающий максимальное отклонение, когда ЦМК использует только НМС5883L и не использует фильтры Калмана (поворот корабля вправо)

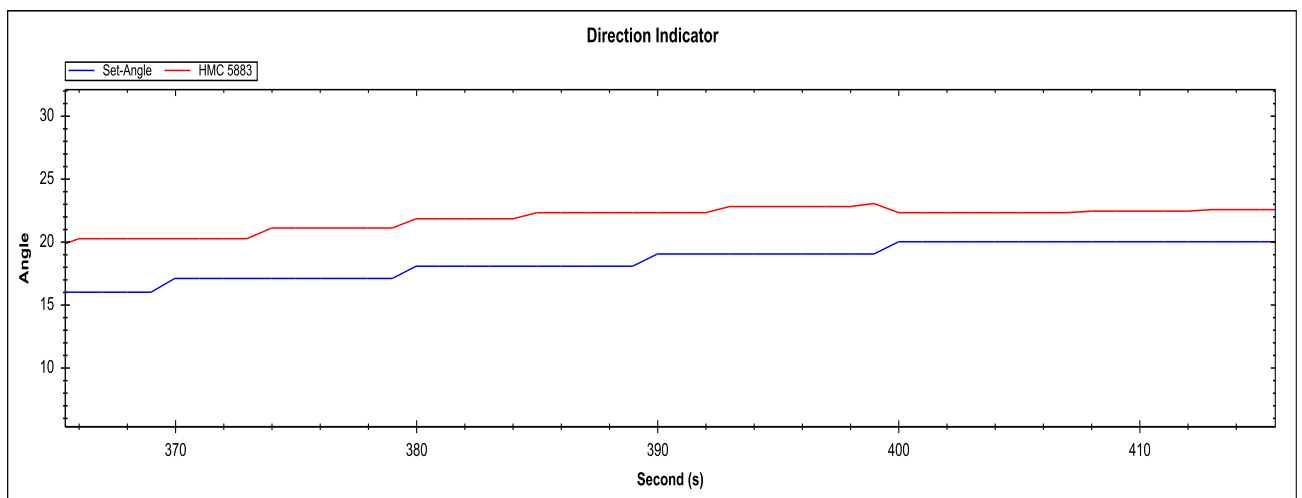


Рисунок 4.8. График показывает наибольшее отклонение, когда ЦМК использует только НМС5883L и использует фильтр Калмана (поворот корабля вправо).

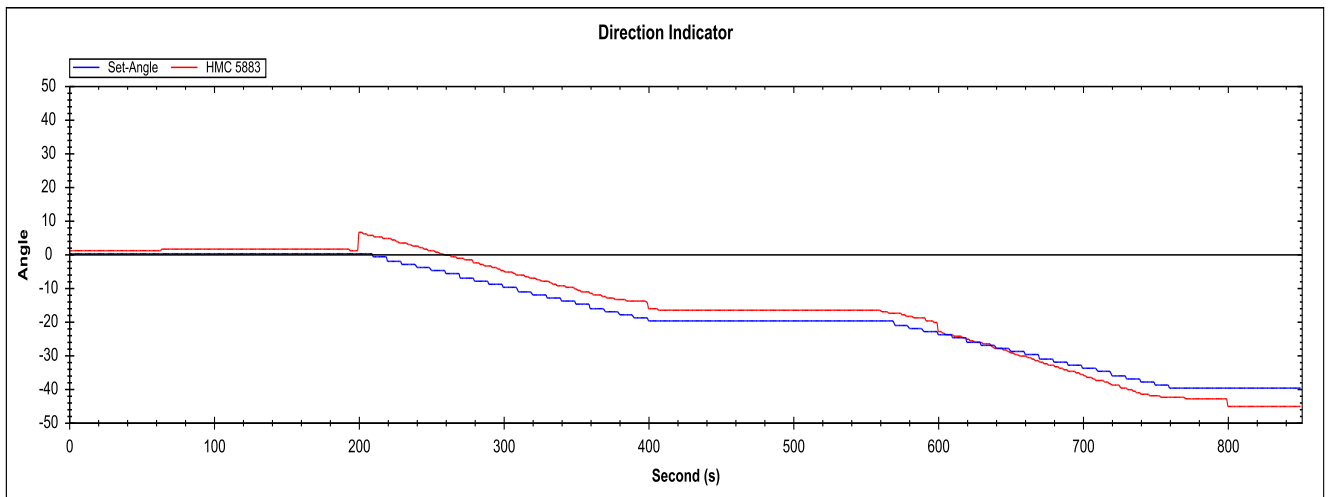


Рисунок 4.9. Результаты теста, когда ЦМК использует только HMC5883L и не использует фильтр Калмана (поворот корабля влево)

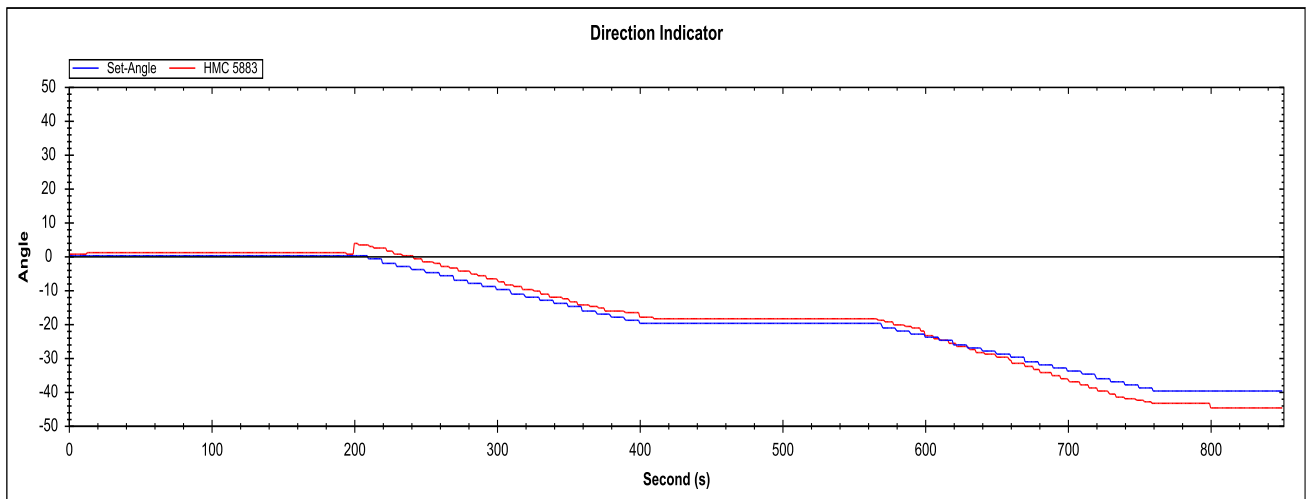


Рисунок 4.10. Результаты теста, когда ЦМК использует только HMC5883L и использует фильтр Калмана (поворот корабля влево)

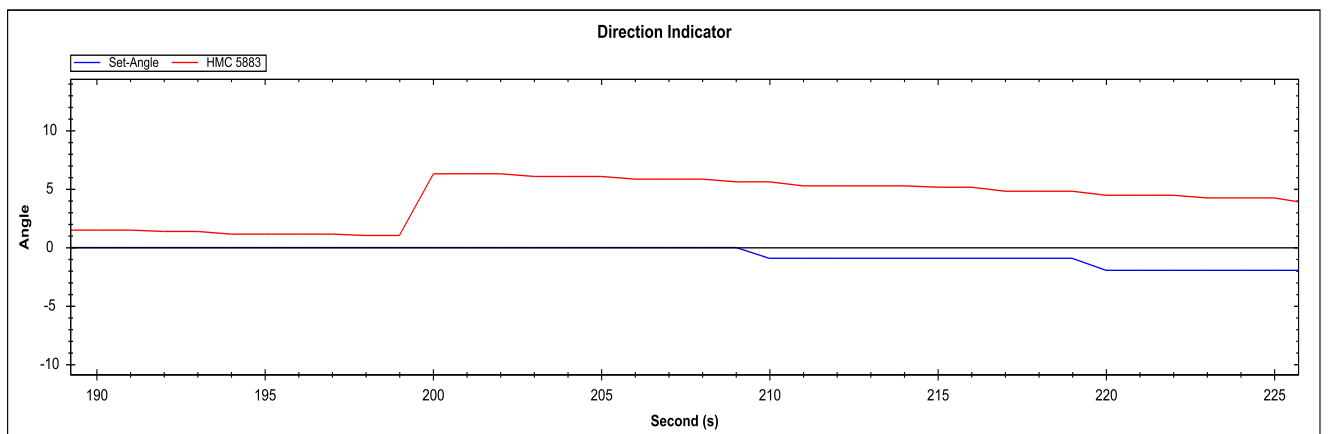


Рисунок 4.11. График, показывающий максимальное отклонение, когда ЦМК использует только HMC5883L и не использует фильтры Калмана (поворот корабля влево)

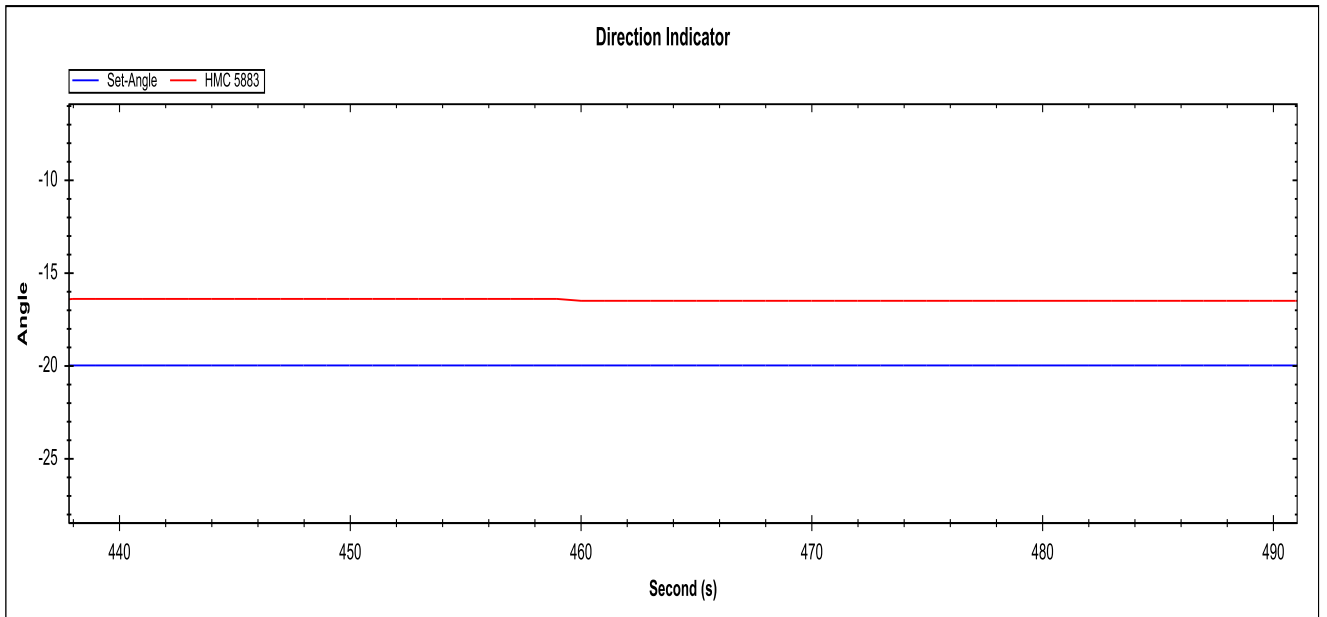


Рисунок 4.12. График показывает наибольшее отклонение, когда ЦМК использует HMC5883L и использует фильтр Калмана (поворот корабля влево)

Оценка результатов эксперимента в случае использования только датчик HMC5883: 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

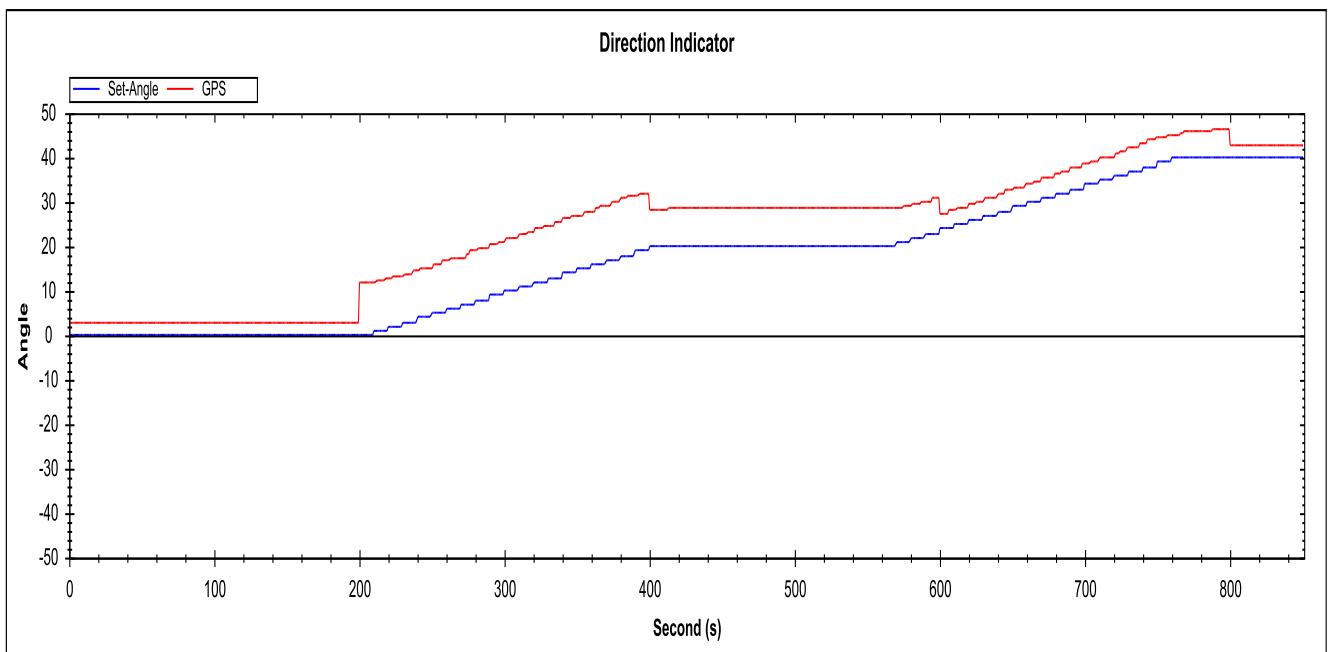


Рисунок 4.13. Экспериментальные результаты, когда ЦМК использует только модуль позиционирования NEO-7M и не использует фильтр Калмана

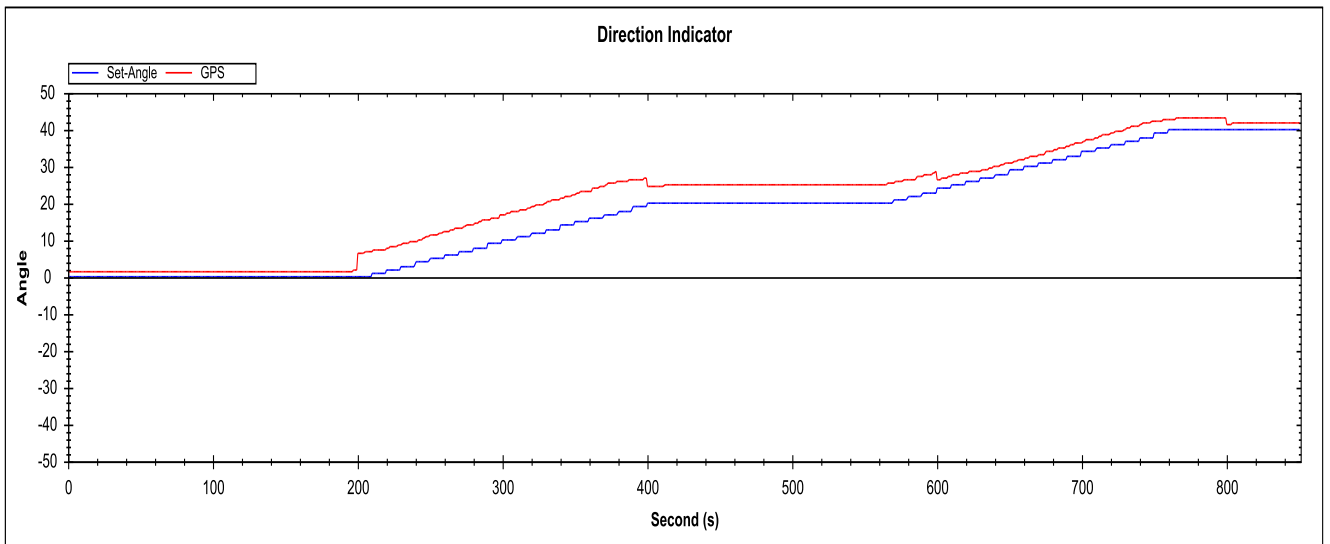


Рисунок 4.14. Экспериментальные результаты, когда ЦМК использует только модуль позиционирования NEO-7М и использует фильтр Калмана

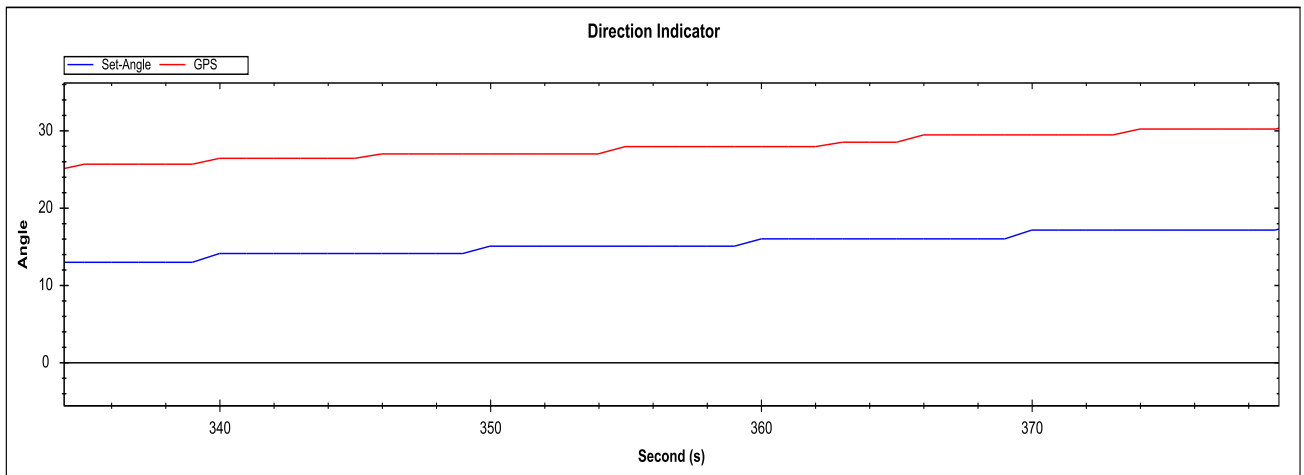


Рисунок 4.15. На графике показано наибольшее отклонение, когда ЦМК использует только модуль позиционирования NEO-7М и не использует фильтр Калмана

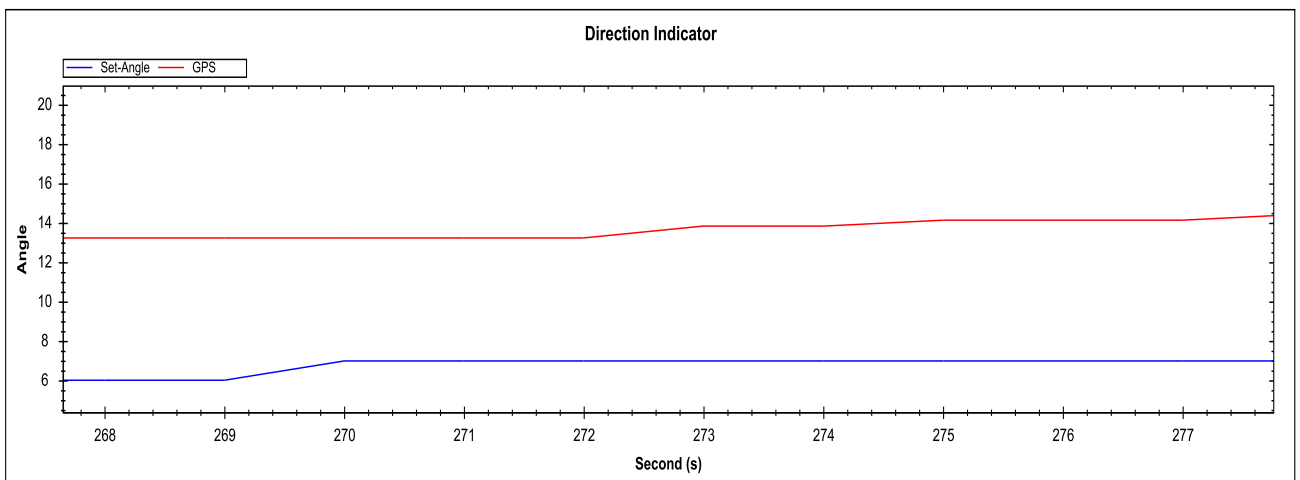


Рисунок 4.16. На графике показано наибольшее отклонение, когда ЦМК

использует модуль позиционирования NEO–7М и использует фильтр Калмана

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–7М

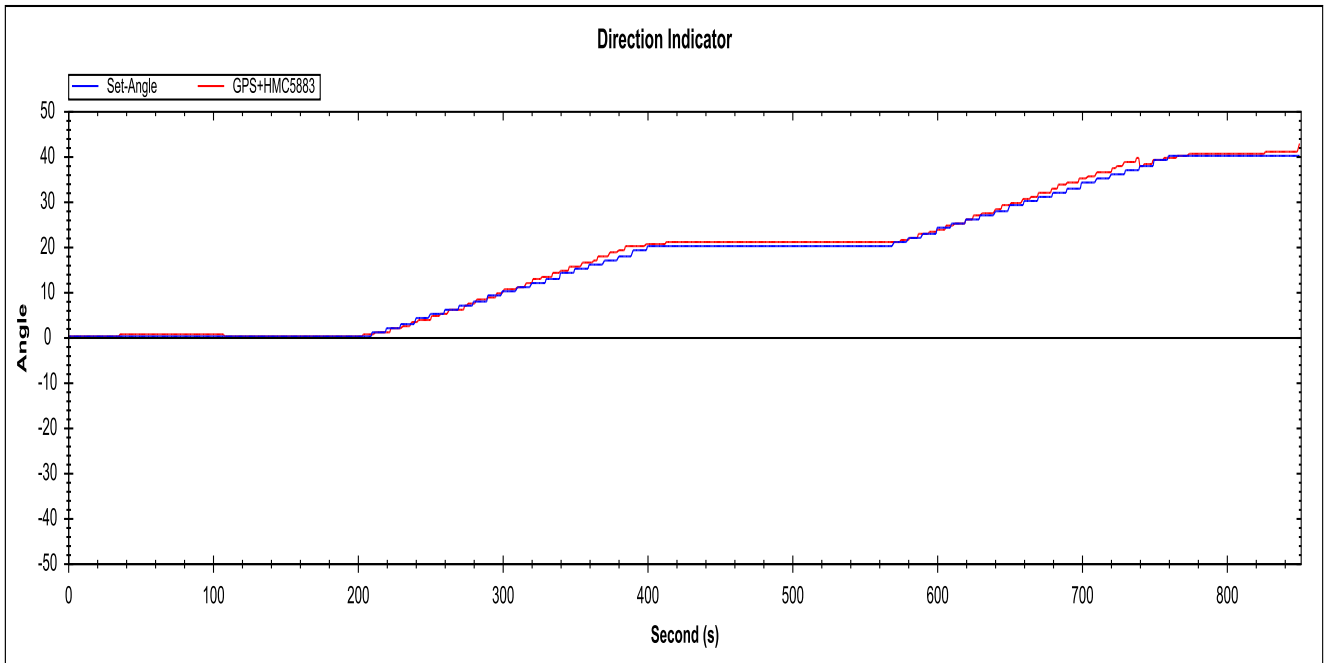


Рисунок 4.17. Измеренный сигнал из ЦМК и стандартного гирокомпаса корабля при одновременном использовании датчика HMC5883L и модуля NEO–7М

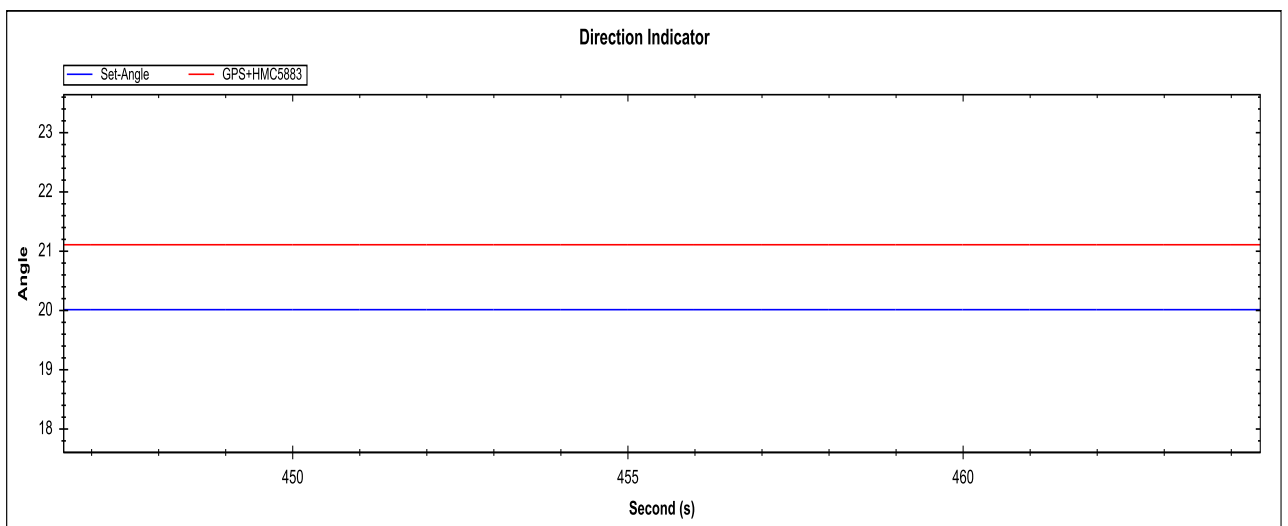


Рисунок 4.18. Наибольшее отклонение измерений ЦМК от сигнала стандартного гирокомпаса корабля при одновременном использовании датчика HMC5883L и модуля NEO–7М

Результаты испытаний, показанные на Рис. 4.17 и Рис. 4.18, 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) выходной сигнал ЦМК имеет наименьшую погрешность по сравнению с выходным сигналом стандартного электрического компаса (1.1 градуса).

4.3.3 Результат фильтрации шумового сигнала для ЦМК на основе интервального подхода [86]

Исследование функционирования примененного фильтра Калмана в условиях реальной эксплуатации на корабле показало его успешную работу при малом и среднем уровне помех и наводок от сильноточных корабельных электрических систем и аппаратуры. Однако при сильных и, особенно, хаотических помехах с неизвестной величиной и неизвестным законом распределения плотностей вероятностей, работа данного фильтра может значительно ухудшаться.

В настоящее время существует несколько математических подходов к решению задач фильтрации. Однако большинство из них опирается на использование информации о вероятностных характеристиках шумовых компонент сигнала. Например, такие классические методы, как Калмановская фильтрация или методы математической статистики (включая стандартный регрессионный метод наименьших квадратов) [36,41], ориентированы на *нормальное* (гауссовское) распределение плотностей вероятностей шумовой компоненты. Альтернативой является подход на основе интервального анализа, который был предложен в пионерской работе Л.В. Канторовича [74]. В настоящее время успешно развиваются как теоретические, так и прикладные вычислительные аспекты данного направления обработки зашумленной информации [75–77]. Здесь используется *только* информация о максимальной величине (максимальном ограничении по модулю) погрешности измерения. При этом в рассматриваемой задаче каждому зашумленному измерению магнитного курса ставится в соответствие интервал неопределённости его возможных

значений; физический смысл интервала неопределённости – это область возможных значений сигнала, содержащая неизвестную истинную измеряемую величину. По набору измерений магнитного курса (т.е. по набору интервалов их неопределённости) в соответствии с принятым описанием модели измеряемого процесса, строится *информационное множество* допустимых значений её параметров и уточняется *трубка* допустимых траекторий (зависимостей) процесса. Методы интервального анализа успешно применялись при решении подобных задач обработки зашумленной экспериментальной информации [37–40].

Алгоритмы и процедуры интервальной фильтрации информации ЦМК дельно рассмотрены в публикациях [78–80] и в главах 2 и 3. Рассмотрим два наиболее представительных результата (рис. 4.19 – 4.22).

Случай постоянного магнитного угла. На всем времени наблюдения судно неподвижно стоит у пирса с постоянным магнитным курсом. Файл реальной выборки (моменты замеров t_n и зашумленные измерения ψ_n магнитного угла) и результаты обработки приведены на рис. 4.19. Длина выборки $N = 23$ замера, данные поступали с тактом dt 1 или 2 сек, полное время наблюдения $T = 34$ сек. Ограничение на максимальное значение погрешности измерения задавалось $e_{\max} = 1.59$ градуса. Здесь замеры магнитного угла нанесены крестиками. Интервалы неопределённости H_n замеров отмечены вертикальными отрезками. Штриховые линии – МНК–линия и верхняя $+2\sigma_{\text{МНК}}$ и нижняя $-2\sigma_{\text{МНК}}$ границы допустимой (по МНК) области значений процесса. 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).

При стендовых испытаниях ЦМК погрешность измерения угла находилась на уровне $\sim 0.4\text{--}0.5$ градуса. При реальной эксплуатации на судне из–за электрических и магнитных наводок, максимальная погрешность измерения (рис. 4.20) возрастает до ~ 1.49 градуса. Для интервальной обработки ограничение на максимальное значение погрешности задавалось $e_{\max} = 1.59$ градуса, т.е. с 10%

запасом.

В конечный момент времени наблюдения оцениваемые параметры принимают следующие численные значения:

- для МНК выходная величина $\psi_T = 228.2$ градуса, СКО $\sigma_T = 1.1$ градуса;
- 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.

Сравнение информационного отрезка $I_T(\psi)$ и интервала $[-2\sigma, +2\sigma]$ по МНК подтверждает, что учет дополнительной информации о максимальном ограничении e_{\max} на погрешность измерений в интервальном подходе позволяет получить более точную гарантированную оценку выходного значения магнитного угла и его точности. Отметим, что оценка ψ_T по МНК, строго говоря, недопустима в интервальном смысле, так как лежит вне (рис. 4.19) информационного интервала $I_T(\psi)$.

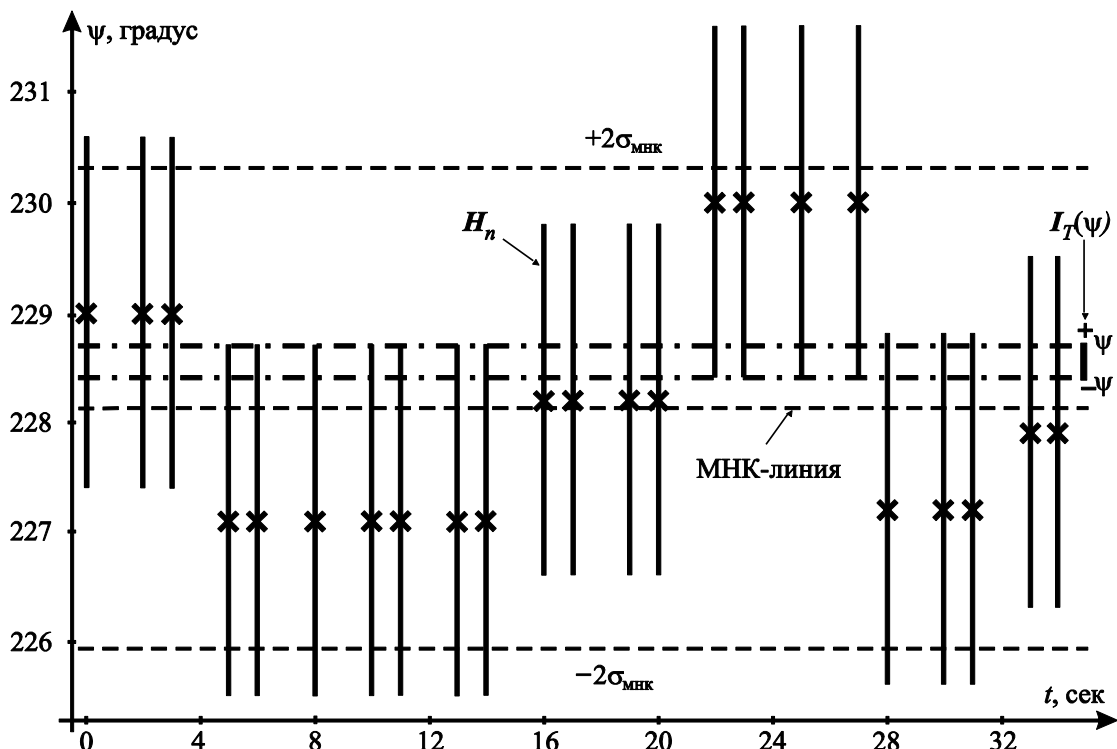


Рисунок 4.19. Пример обработки данных ЦМК; судно стоит у пирса с постоянным курсом

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. 4.20. Длина выборки замеров $N = 30$, замеры поступают с тактами dt 1 и 2 сек, полное время наблюдения $T = 43$ сек. Ограничение на максимальное значение погрешности измерения задавалось $e_{\max} = 0.79$ градусов.

Выполняется оценивание множества $I(\psi_n, \omega)$ допустимых значений магнитного угла и угловой скорости разворота судна.

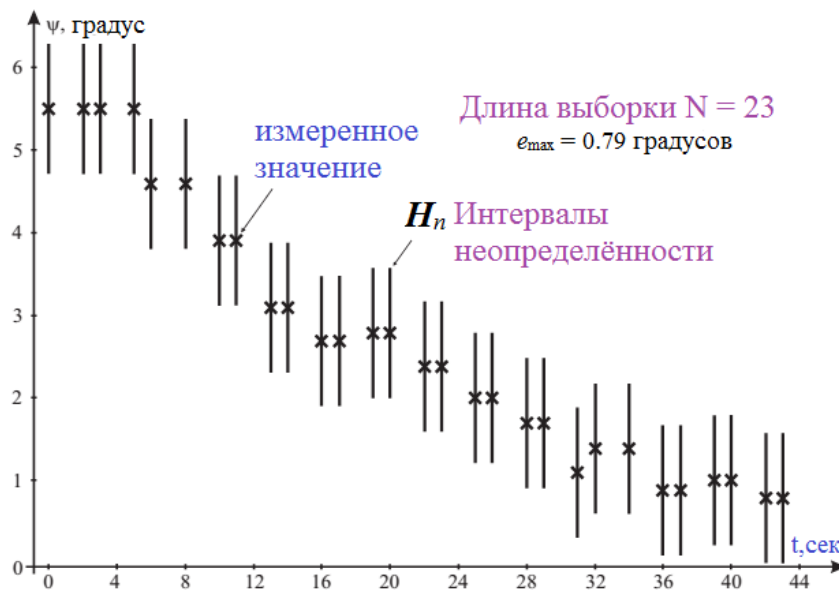


Рисунок 4.20. Пример обработки данных ЦМК; судно разворачивается с постоянной скоростью

Результаты построения искомого множества $I(\psi_n, \omega)$ значений параметров (ψ_n, ω) представлены на рис. 4.21. Множество имеет вид неправильного многоугольника. Минимальная внешняя box-оценка параметров (ψ_n, ω) отмечена пунктирными сносками. Поскольку вероятностные характеристики погрешностей измерений неизвестны, то для дальнейших расчетов используется средняя точка $(\psi_{n, \text{cp}}, \omega_{\text{cp}})$ этого множества.

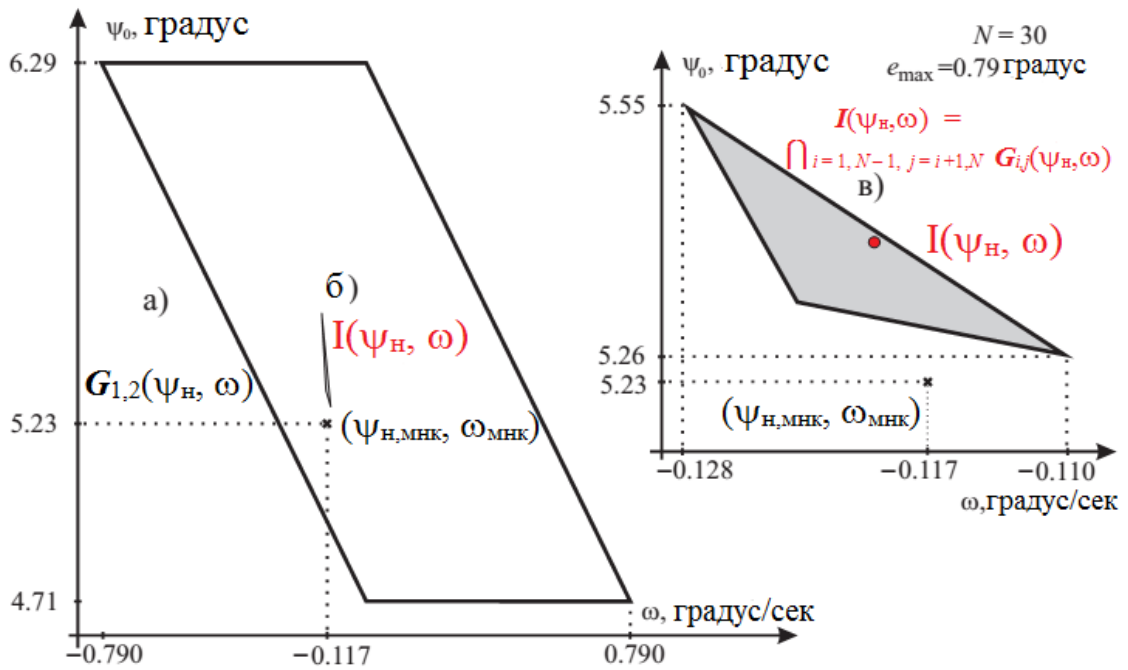


Рисунок 4.21. Движение судна с разворотом; оценка информационного множества параметров (ψ_H, ω) ; а) грубая оценка по двум первым замерам; б) сравнительный размер множества в мелком масштабе; в) информационное множество (увеличено); крестик – точка по МНК

Трубка допустимых зависимостей показана на рис. 4.22 (затенена). Здесь крестики – замеры магнитного угла. Интервалы неопределённости замеров отмечены вертикальными отрезками. Штриховые линии: МНК–линия и верхняя $+2\sigma_{MNK}$ и нижняя $-2\sigma_{MNK}$ границы допустимой (по МНК) области значений процесса. Нижняя ${}_{-}Tb(t_i)$ и верхняя ${}_{+}Tb(t)$ границы трубки $Tb(t)$ допустимых значений процесса по интервальному оцениванию отмечены жирными сплошными линиями. Белыми кружками отмечены граничные точки тех интервалов неопределенности, которые формируют границы трубки. Отметим, что, строго говоря, точечная оценка $\psi_{H, MNK}, \omega_{MNK}$ недопустима в интервальном смысле так как она лежит вне информационного множества (рис. 4.21) и соответствующая МНК–линия частично выходит за трубку допустимых зависимостей (рис. 4.22). Однако данная оценка является практически полезной.

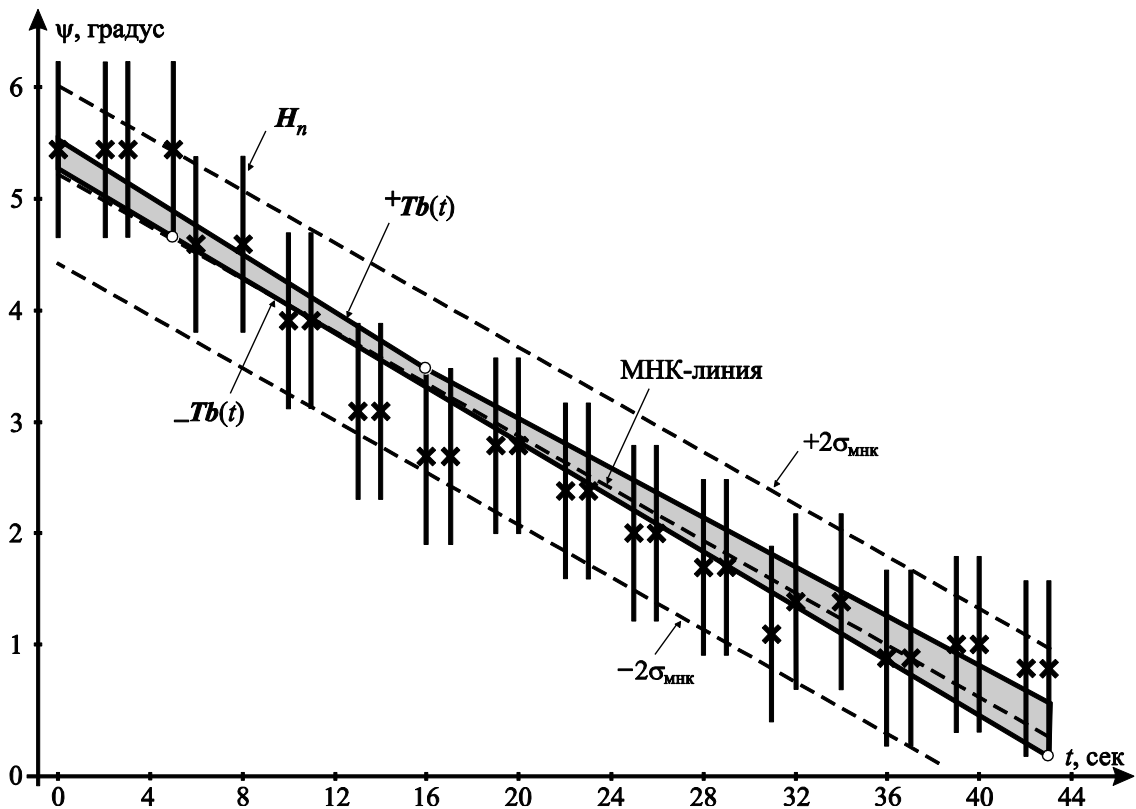


Рисунок 4.22. Движение судна с разворотом; трубка допустимых зависимостей (серая заливка); оценка по МНК и $\pm 2\sigma$ границы этой оценки (штриховые линии)

Результаты обработки данного файла принимают следующие численные значения:

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

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

Из сравнения этих данных и рис. 4.22 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.

Таким образом, исследованный интервальный подход к фильтрации зашумленной информации ЦМК может быть рекомендован к практическому применению, так как обеспечивает устойчивую работу и существенно лучшую точность выходной отфильтрованной информации. Особенно, в реальных условиях неопределённости вероятностных характеристик шумовой компоненты в измерении сигнала.

4.4 Тестирование индикаторных устройств в составе системы

Для проведения теста индикаторные устройства подключаются к компьютеру с помощью преобразователя USB485. На компьютере было установлено ПО (Рис.4.23), имеющее функции генерации сигнала компаса в формате NMEA0183 и передачи на индикаторные устройства. Схема подключения компьютера и тестовых устройств показана на Рис. 4.24. Результаты испытаний индикаторных устройств, представленные в Таб. 4.1, показывают, 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 4.23. Интерфейс ПО для тестирования индикаторных устройств

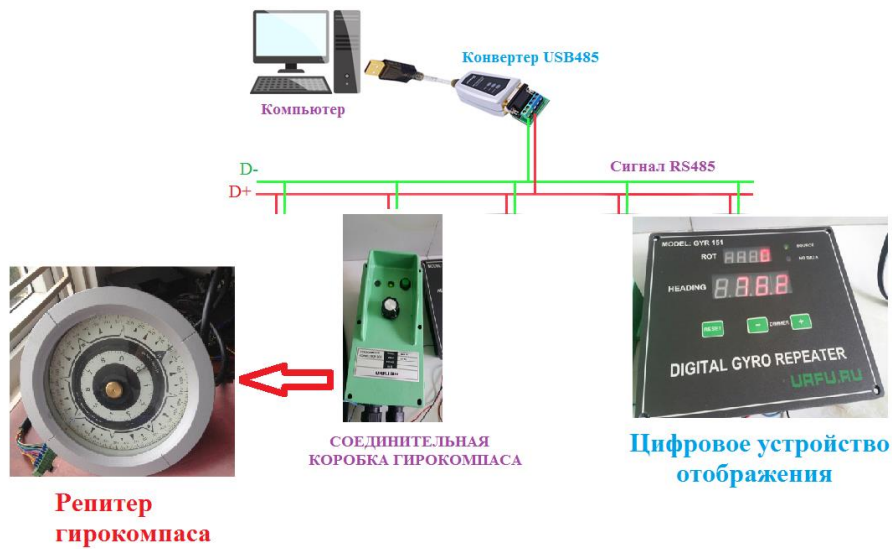


Рисунок 4.24. Схема подключения компьютера и тестовых устройств

Таблица 4.1. Результаты испытаний индикаторных устройств

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

4.5. Выводы по Главе 4

Результаты разработки и испытаний ЦМКС, представленные в данной главе диссертации, позволяют сделать следующие выводы:

4.1. При использовании в ЦМК только датчика магнитного поля НМС5883L при работе без фильтрации шума выходное значение показаний ЦМК имеет погрешность до 10 градусов. При обработке показаний ЦМК с помощью фильтра Калмана уровень погрешности снижается до 4 градусов.

4.2. В том случае если в ЦМК используется только модуль приема сигналов GPS/ГЛОНАСС NEO-7M 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).

4.3. При одновременном использовании датчика HMC5883L и модуля NEO-7M в составе ЦМК и при использовании в микроконтроллере ATMEGA128 программы фильтра Калмана выходной сигнал ЦМК имеет наименьшую погрешность по сравнению с выходным сигналом стандартного электрического компаса до 1.1 градуса. Результаты испытаний работы индикаторных устройств азимута показывают наименьшее отклонение – менее 0.5 градусов.

4.4. На основе применения стандартного статистического подхода и интервальных оценок обеспечиваются более точные гарантированные оценки параметров процесса изменения курса корабля и более точная трубка допустимых зависимостей. Исследования показали, что в реальных условиях стандартный и интервальный подходы дополняют друг друга и позволяют более широко проводить качественный и количественный анализ показаний ЦМК.

4.5. 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.

Основные результаты исследования отражены в работах [78–87].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Заключении обобщаются основные результаты научных исследований, разработки, изготовления и практических испытаний ЦМКС. Из этих результатов следует, что поставленная цель работы достигнута, а именно: проведены теоретические исследования путей повышения точности определения курса корабля, выполнены проектирование, разработка и экспериментальные исследования 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 семисегментных светодиодов,

предназначенных для отображения азимута и скорости вращения судов, микросхема МАХ485 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 АТМЕГА8, 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, красотой, 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.

Перспективы дальнейшего развития темы исследования 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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ИМО — Международная морская организация
- КС — Компасная система
- ЭКС — Электрическая компасная система
- ЦМКС — Цифровая магнитная компасная система
- ГНСС — Глобальная навигационная спутниковая система
- ТС — Транспортное средство
- GPS — Global Positioning System
- ЦМК — Цифровой магнитный компас
- NMEA — National Marine Electronics Association
- I2C — Inter-Integrated Circuit
- TTL — Transistor-transistor logic
- UART — Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
- SPI — Serial Peripheral Interface
- USB — Universal Serial Bus
- FDMA — Frequency Division Multiple Access
- WAAS — Wide area augmentation system
- RISC — Reduced Instruction Set Computing
- АЦП — Аналого-цифровой преобразователь
- TQFP — Thin Quad Flat Pack
- RS-485 — Recommended Standard 485
- ЧПУ — Числовое программное управление
- ASIC — Интегральная схема специального назначения
- IEEE — Institute of Electrical and Electronics Engineers
- СГС — (сантиметр-грамм-секунда)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морское судовождение / Г. Г. Ермолаев, Л. П. Андронов, Е. С. Зотеев [и др.]. – 3-е изд., перераб. – Москва : Транспорт, 1970. – 375 с.
2. Воронов В. В. Магнитные компасы, теория, конструкция и девиационные работы / В. В. Воронов, Н. Н. Григорьев, А. В. Яловенко. – СПб : Элмор, 2004. – 192 с.
3. Лукомский Ю. А. Навигация и управление движением судов : учеб / Ю. А. Лукомский, В. Г. Пешехонов, Д. А. Скороходов. – СПб : Элмор, 2002. —360 с.
4. Выбор и использование персональных навигаторов GPS [Электронный ресурс]. — режим доступа: <http://v-dorogu.narod.ru/article/kompassgps.htm> (дата обращения 07.12.2019).
5. Компас на морском судне [Электронный ресурс]. — режим доступа: <http://www.seaships.ru/compass.htm> (дата обращения 07.12.2019).
6. IMO Resolution A.382(X) Recommendations on performance standards for magnetic compasses [Electronic resource]. — Mode of access: https://puc.overheid.nl/nsi/doc/PUC_2469_14/1/ (Date of access 07.12.2019).
7. IMO Resolution A.382(X)—1977 Magnetic compasses carriage and performance standards [Electronic resource]. — Mode of access: https://puc.overheid.nl/nsi/doc/PUC_2469_14/1/ (Date of access 07.12.2019).
8. International standard ISO 25862–2009 Ships and marine technology — Marine magnetic compasses, binnacles and azimuth reading devices. First edition, 2009–05–15, pp. 1–7.
9. Лекция 12– Геомагнетизм. – С. 2–3 [Электронный ресурс]. — режим доступа: http://vvkuz.ru/books/lectures_2/12.pdf (дата обращения 07.12.2019).
10. Михаил Русских. Магнитометры: принцип действия, компенсация ошибок / Михаил Русских // Журнал РАДИОЛОЦМАН. – 2012. – сентябрь 2012. – С. 31–38.
11. Honeywell. 3-осевой цифровой компас MOD–HMC5883L с 12-битным АЦП [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://ekb.terraelectronica.ru/news/4209> (дата обращения 07.12.2019).
12. Каталог №. М–1545. Электромагнитный датчик курса PG–700 [Электронный ресурс] / производитель «FURUNO». – режим доступа: http://www.sigmaplus.kz/files/PG-700_Brochure_ru.pdf (дата обращения 07.12.2019).
13. Магнитный компас Furuno PG–1000 [Электронный ресурс] / производитель «FURUNO». – режим доступа: <https://zoomgps.ru/products/view/83/3> (дата обращения 07.12.2019).
14. Каталог магнитные компасы «Азимут–90–1» и «Азимут–90М» [Электронный ресурс] / АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР», 2016. – режим доступа: <http://www.elektropribor.spb.ru/upload/iblock/769/76936d10f3a07935b4068c3088122b59.pdf> (дата обращения 07.12.2019).

15. Измерение времени. Основы GPS / К. Одуан, Б. Гино, Перевод с английского Ю. С. Домина под редакцией В.М. Татаренкова с дополнением (глава 10) М. Б. Кауфмана – Москва: Техносфера, 2002. – 400 с.
16. Чан Суан Чунг. Разработка средств оценки эффективности гибридных электрических трансмиссий на основе анализа траекторий движения транспортного средства : дис. ... кандидата технических. наук : 05.09.03/ Анучин А.С. – Москва, 2018. – 137 с.
17. Соловьев Ю. А. Системы спутниковой навигации / Ю. А. Соловьев. – Москва : Эко–Трендз, 2000. — 270 с.
18. Яценков В. С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС / В. С. Яценков. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2005. – 272 с.
19. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Р. В. Бакитько, Е. Н. Болценков, Н. Т. Булавский, [и др.] ; Под ред. А. И. Петрова, В. Н. Харисов. –4–е Изд., перераб. И доп. – Москва. Радиотехника, 2010. – 800 с.
20. The application of satellite compass for GNSS–spoofing detecting/ Larisa Dobryakova, Lukasz Lemieszewski, Eugeniusz Luszniokov, Evgeny Ochin Scientific Journals / Maritime University of Szczecin // 2014, 37(109) pp. 28–33, ISSN 1733–8670.
21. Атаки на глобальные навигационные спутниковые системы и обнаружение спуфинга беспилотных кораблей, базирующееся на облачных технологиях/ Л. А. Добрякова , Л. С. Лемишевский , Е. Ф. Очин // Ural radio Engineering Journal, DOI 10.15826/urej.2018.2.2.003.
22. ГНСС and ДГНСС Spoofing Detection / Evgeny Ochin Ural radio Engineering Journal, DOI10.15826/urej.2017.1.1.003.
23. Лахтина Н. Ю. Системы определения местоположения и идентификации транспортных средств: метод. пособие / Н. Ю. Лахтина, К. Г. Манушакян. – Москва : МАДИ, 2017.
24. Лахтина Н.Ю. Техническое обеспечение телематических систем: метод. пособие / Н. Ю. Лахтина, К. Г. Манушакян. – Москва : МАДИ, 2015.
25. Власов В.М. Информационные технологии на автомобильном транспорте: учебник для студентов учреждений высшего образования / В. М. Власов, Д. Б. Ефименко, В. Н. Богумил. – Москва: Издательский дом «Академия», 2014. – 256 с.
26. Богданов М. Р. Применение GPS/ГЛОНАСС: Учебное пособие / М. Р. Богданов. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2012. – 136 с.
27. Описание NMEA протокола [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://yug-gps.narod.ru/docs/000x/st007.htm> (дата обращения 07.12.2019).
28. The NMEA0183 Protocol [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.tronico.fi/ОН6NT/docs/NMEA0183.pdf> (Date of access 07.12.2019).
29. National Marine Electronics Association [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.nmea.org> (Date of access 07.12.2019).
30. Описание протокола NMEA–0183 [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://spacegrad.ru/NMEA–0183> (дата обращения 07.12.2019).

31. Протокол обмена IEC 61162–1 (NMEA–0183). ЦВИЯ.460951.001 [Электронный ресурс]. – режим доступа: https://www.irz.ru/uploads/files/226_1.pdf (дата обращения 07.12.2019).
32. Фильтр Калмана — Введение [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://habr.com/post/140274/> (дата обращения 07.12.2019).
33. Гаврилов А. В. Использование фильтра калмана для решения задач уточнения координат бпла / А. В. Гаврилов // Москва : Физико–математические науки, Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1 (часть 1).
34. Instrumentation of an Array of Ultrasonic Sensors and Data Processing for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Teaching the Application of the Kalman Filter / Juan S. Guerrero Guerrero, Aldo F. Contreras González, Jose I. Hernández Vega, Leticia A. Neira Tovar // 2015 International Conference on Virtual and Augmented Reality in Education, Procedia Computer Science 75. – 2015. – P. 375 – 380.
35. R.E Kalman. A new approach to linear filtering and prediction problems / R.E Kalman // Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering. – 1960. – Volume 82 . – P. 34–45.
36. Р 40.2.028–2003. Рекомендации. Государственная Система Обеспечения Единства Измерений. Рекомендации по построению калибровочных характеристик. Оценка погрешностей (неопределённости) линейных калибровочных характеристик. Применение Метода Наименьших Квадратов. – Москва : Госстандарт, Издание официальное.
37. Kumkov S.I. An Estimation Problem of Chemical Process with Confluent Parameters: An Interval Approach / Kumkov S.I // Reliable Computing. – 2016. – Volume 22. – P. 15–25. – Mode of access: <http://sector3.imm.uran.ru/stat/reliable-computing-22-pp-015-025.pdf>.
38. Kumkov S.I. Mikushina. Interval Approach to Identification of Catalytic Process Parameters / Kumkov S.I, Yu.V // Reliable Computing. – 2014. – Volume 19. – P. 197–214.
39. Кумков С. И. Обработка экспериментальных данных ионной проводимости расплавленного электролита методами интервального анализа // С. И. Кумков // Расплавы. – 2010. – С. 86–96.
40. Обработка экспериментальных данных по вязкости при одностороннем смещении ошибок измерения / Потапов А.М., Кумков С.И., Sato Y // Расплавы. – 2010. – № 3. – С. 55–70.
41. МИ 2083–93. Рекомендации. Государственная Система Обеспечения Единства Измерений. Определение результатов и змерений и оценка их погрешностей . –Москва : Гогсстандарт, Издание официальное.
42. HMC5883 Database Sheet online [Electronic resource]. – Mode of access: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/795536/Honeywell/HMC5883/1> (Date of access 07.12.2019).
43. ATmega128/L Datasheet – Microchip Technology [Electronic resource]. – Mode of access: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/doc2467.pdf> (Date of access 07.12.2019).

44. Описание интерфейса I²C [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://t.bratsk.su/radio/interface/i2c/Opisanie%20interveisa%20I2C.pdf> (дата обращения 07.12.2019).
45. Data Sheet u-blox 7 GNSS modules / Document number : UBX-13003830, Revision R07, 11-Nov-2014 [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-7_DataSheet_%28UBX-13003830%29.pdf (Date of access 07.12.2019).
46. NEO-7: модули GPS/GNSS [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://microsin.net/adminstuff/hardware/u-blox-neo-7-gps-gnss-modules.html> (дата обращения 07.12.2019).
47. Max485 Datasheet [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/73463/MAXIM/MAX485.html> (Date of access 07.12.2019).
48. Разевиг В. Д. Система проектирования OrCAD 9.2 / В. Д. Разевиг. – Москва : Солон-Р. – 2001.
49. Datasheet LM2576 [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2576.pdf> (Date of access 07.12.2019).
50. Improvement of electronic compass accuracy based on magnetometer and accelerometer calibration / M.Sipos, J. Rohac, P. Novacek // Acta Phys. Polonica A 121 . – 2012. – P. 945–949.
51. M.J. Caruso. Applications of magnetoresistive sensors in navigation systems / M.J. Caruso // SAE Trans 106. – 1997. – P. 1092–1098.
52. Vadym Grygorenko. Sensing – Magnetic Compass with Tilt Compensation [Электронная книга]. – Mode of access: <http://www.cypress.com/file/130456/download> (Date of access 07.12.2019).
53. Performance and applications of a two axes fluxgate magnetic field sensor fabricated by a CMOS process / H. Gruger, R. Gottfried–Gottfried // Sensors and Actuators A 2909. – 2001. – P. 1–4.
54. Design and Implementation of a Simple HMC6352 2–Axis–MR Digital Compass / C. K. Agubor, G. N. Ezeh, M. Olubiwe, O. C. Nosiri // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2015. – Volume 5, Issue 3.
55. Digital Magnetic Compass Integration with Stationary, Land–Based Electro–Optical Multi–Sensor Surveillance System / Branko Livada, Saša Vujić, Dragan Radić, Tomislav Unkašević, Zoran Banjac // Sensors. – 2019. – Volume 19, 4331.
56. Datasheet AMS1117 [Electronic resource].– Mode of access: <https://static.chipdip.ru/lib/552/DOC001552809.pdf> (Date of access 07.12.2019).
57. Интерфейсы RS-485, RS-422 и RS-232 [Электронный ресурс] .– режим доступа: https://www.bookasutp.ru/Chapter2_3.aspx (дата обращения 07.12.2019).
58. ATmega16 Datasheet – Microchip Technology [Electronic resource] .– Mode of access: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/doc2466.pdf> (Date of access 07.12.2019).
59. A1015 Transistor Datasheet PDF [Electronic resource].– Mode of access: <https://datasheetspdf.com/parts/A1015.pdf?id=157040> (Date of access 07.12.2019).

60. Datasheet Atmega8L [Electronic resource].– Mode of access: https://www.mouser.com/datasheet/2/268/Atmel-2486-8-bit-AVR-microcontrollerATmega8_L_dat-1315266.pdf (Date of access 07.12.2019).
61. L297– Контроллер шаговых электродвигателей [Электронный ресурс].– режим доступа: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00000063.pdf> (дата обращения 07.12.2019).
62. Электроника (станок с ЧПУ для домашней мастерской) [Электронный ресурс].– режим доступа: <http://stepmotors.ru/theory/02/02.htm> (дата обращения 07.12.2019).
63. Dual Full–Bridge Driver L298 [Electronic resource] .– Mode of access: https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/L298_H_Bridge.pdf (Date of access 07.12.2019).
64. Оптопара PC817 принцип работы и очень простая проверка. [Электронный ресурс].– режим доступа: <http://schip.com.ua/pc817/> (дата обращения 07.12.2019).
65. CodeVisionAVR [Electronic resource].– Mode of access: <https://сhem.net/software/codevisionavr.php> (Date of access 07.12.2019).
66. Комаровский Ю. А.. Использование GPS–аппаратуры для оценки остойчивости судна по углу крена на установившейся циркуляции/ Ю. А. Комаровский. // Владивосток: Гнозис. – 2015. – С. 39–50.
67. Комаровский Ю. А. Влияние расположения спутников на точность работы GPS–комшаса JLR–10T / Ю. А. Комаровский // Владивосток: ДВО Российской Академии транспорта. – 2009. – С. 103–105.
68. SATELLITE COMPASS Model SC–50 [Electronic resource].– Mode of access: https://www.em-schiffselektronik.de/upload/1360679_GPS%20Kompass%20Furuno%20SC%2050.pdf
69. Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points [Electronic resource].– Mode of access: <https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html> (Date of access 07.12.2019).
70. Great Circle Distances and Bearings Between Two Locations, R. Bullock [Electronic resource].– Mode of access: https://dtcenter.org/met/users/docs/write_ups/gc_simple.pdf (дата обращения 07.12.2019).
71. Certificate. Maritime Trading and Service Technology Co., Ltd (MTS). Test results and assessment of the Digital Magnetic Compass system. Hai Phong, Viet Nam, August 2017.
72. Certificate. Thao Linh DMTCO.,Ltd. Test results and assessment of the Digital Magnetic Compass system. Hai Phong, Viet Nam, September 2017.
73. Vu Xuan Hau .Tables of measurements of the digital magnetic compass system on ships in Vietnam / Haiphong, Vietnam, September 2017.
74. Канторович Л. В. О некоторых новых подходах к вычислительным методам и обработке наблюдений / Л. В. Канторович // Сибирский математический журнал. –1962. – С. 701–709.
75. Прикладной интервальный анализ / Жолен Л., Киффер М., Дидри О., Э. Вальтер // Москва–Ижевск. Регулярная и хаотическая динамика. – 2007.

76. Глобальная оптимизация с помощью методов интервального анализа / Хансен Э., Уолстер Дж. У. Уолстер // Москва–Ижевск, Регулярная и хаотическая динамика. – 2010.

77. Шарый С. П. Конечномерный интервальный анализ [Электронная книга 2018] / С. П. Шарый // . – режим доступа: <http://www.nsc.ru/interval/Library/InteBooks>.

78. 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). – 2019. – № 5. – 16с. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may19/6/text.pdf>.

79. Vu Xuan Hau. Results of the Development and Experimental Studies of the Digital Magnetic Compass System / Vu Xuan Hau, V. E. Ivanov // Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT 2018). – 2018. – IEEE Xplore. – P. 359–362.

80. 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.

81. 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.

82. Vu Xuan Hau. Designing the maritime digital compass repeater hardware and its controlling algorithm/ Vu Xuan Hau, V. E. Ivanov // T- Comm. – 2020. Т. 14. – № 7. – С. 51–56.

83. 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 (USBREIT 2020). – 2020. –IEEE Xplore. – P. 313–317.

84. 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.

85. 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.

86. 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.

87. 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) молодёжной школы-конференции, тез. докл. – 4–10 февраля 2018. – С. 69.

Приложение 1. Программный код для устройств ЦМКС
А. Код программы загружается в микроконтроллер АТМЕГА128 внутри ЦМК

```

#include <mega128.h>
#include <delay.h>
#include <i2c.h>
#include <math.h>
#define HMC5883L_ID 0x3c
#define CRA 0x00
#define CRB 0x01
#define MODE 0x02
#define XH 0x03
#define XL 0x04
#define ZH 0x05
#define ZL 0x06
#define YH 0x07
#define YL 0x08
#define ENX PORTB.3
int x,y,z;
float angle;
float Pk;
float P_k = 0.000;
float Q = 0.003;
float Kk = 0.000;
float xk = 0.000;
float x_k = 0.000;
float  $\alpha$  =0.000;
float R=2.000;
float LatA, LonA, LatB, LonB=0.000;
float Diff_lon, Diff_lat=0;
float  $\beta$  ,  $\Psi$  =0;
unsigned char next=0;
unsigned char enable=0;
unsigned char index=0;
unsigned char Array_gps[50];
unsigned char manggps[25];
char header_ok=0;
#asm
.equ __i2c_port=0x12 ;PORTD
.equ __sda_bit=1
.equ __scl_bit=0
#endasm
void hmc5883l_wirte(unsigned char addr, unsigned char data);
void hmc5883l_init(void);
unsigned char hmc5883l_read(unsigned char addr);
void hmc5883l_measur(int *x,int *y, int *z);

```

```

void send_NMEA(unsigned int angle);
void hmc5883l_wirte(unsigned char addr, unsigned char data)
{
i2c_start();
i2c_write(HMC5883L_ID);
i2c_write(addr);
i2c_write(data);
i2c_stop();
delay_ms(10);
}
unsigned char hmc5883l_read(unsigned char addr)
{
unsigned char data;
i2c_start();
i2c_write(HMC5883L_ID);
i2c_write(addr);
i2c_start();
i2c_write(HMC5883L_ID | 1);
data=i2c_read(0);
i2c_stop();
return data;
}
void hmc5883l_init(void)
{
hmc5883l_wirte(CRA,0x70); //8- average, 15Hz
hmc5883l_wirte(CRB,0x20); //1.3Ga
hmc5883l_wirte(MODE,0x00); //continuous mode
}
void hmc5883l_measur(int *x,int *y, int *z)
{
int xh,xl,zh,zl,yh,yl;
xh=hmc5883l_read(XH);
xl=hmc5883l_read(XL);
zh=hmc5883l_read(ZH);
zl=hmc5883l_read(ZL);
yh=hmc5883l_read(YH);
yl=hmc5883l_read(YL);
*x=(xh<<8)|xl;
*y=(yh<<8)|yl;
*z=zh*256+zl;
}
#ifndef RXB8
#define RXB8 1
#endif
#ifndef TXB8
#define TXB8 0
#endif
#ifndef UPE

```

```

#define UPE 2
#endif
#ifndef DOR
#define DOR 3
#endif
#ifndef FE
#define FE 4
#endif
#ifndef UDRE
#define UDRE 5
#endif
#ifndef RXC
#define RXC 7
#endif
#define FRAMING_ERROR (1<<FE)
#define PARITY_ERROR (1<<UPE)
#define DATA_OVERRUN (1<<DOR)
#define DATA_REGISTER_EMPTY (1<<UDRE)
#define RX_COMPLETE (1<<RXC)
// USART0 Transmitter buffer
#define TX_BUFFER_SIZE0 8
char tx_buffer0[TX_BUFFER_SIZE0];
#if TX_BUFFER_SIZE0 <= 256
unsigned char tx_wr_index0,tx_rd_index0,tx_counter0;
#else
unsigned int tx_wr_index0,tx_rd_index0,tx_counter0;
#endif
// USART0 Transmitter interrupt service routine
interrupt [USART0_TXC] void usart0_tx_isr(void)
{
if (tx_counter0)
{
--tx_counter0;
UDR0=tx_buffer0[tx_rd_index0++];
#if TX_BUFFER_SIZE0 != 256
if (tx_rd_index0 == TX_BUFFER_SIZE0) tx_rd_index0=0;
#endif
}
}
#ifndef _DEBUG_TERMINAL_IO_
// Write a character to the USART0 Transmitter buffer
#define _ALTERNATE_PUTCHAR_
#pragma used+
void putchar(char c)
{
while (tx_counter0 == TX_BUFFER_SIZE0);
asm("cli")
if (tx_counter0 || ((UCSR0A & DATA_REGISTER_EMPTY)==0))

```



```

{
    tx_buffer0[tx_wr_index0++]=c;
#if TX_BUFFER_SIZE0 != 256
    if (tx_wr_index0 == TX_BUFFER_SIZE0) tx_wr_index0=0;
#endif
    ++tx_counter0;
}
else
    UDR0=c;
#asm("sei")
}
#pragma used-
#endif
#define RX_BUFFER_SIZE1 8
char rx_buffer1[RX_BUFFER_SIZE1];
#if RX_BUFFER_SIZE1 <= 256
unsigned char rx_wr_index1,rx_rd_index1,rx_counter1;
#else
unsigned int rx_wr_index1,rx_rd_index1,rx_counter1;
#endif
// This flag is set on USART1 Receiver buffer overflow
bit rx_buffer_overflow1;
interrupt [USART1_RXC] void usart1_rx_isr(void)
{
    char status,data;
    char i;
    status=UCSR1A;
    data=UDR1;
    if (header_ok==0)
    {
        if ((data=='$'))
        {
            Array_gps[0]=data;
            index=1;
        }
        else
            if ( Array_gps[0]=='$')
            {
                Array_gps[index]=data;
                index++;
                if (index==6)
                {
                    if ((Array_gps[3]=='R')&&(Array_gps[4]=='M')&&(Array_gps[5]=='C'))
                    {
                        header_ok=1;
                        // commas=0;
                    }
                }
            }
        else

```

```

        {
            header_ok=0;
            index=0;
            //finish=0;
            for (i=0;i<50;i++)
                Array_gps[i]=0;
        }
    }
}

else
{
    if (header_ok==1)
    {
        if (data==0x0d)
        {
LatA=Array_gps[20]*10000+Array_gps[21]*1000+Array_gps[22]*100+Array_gps[23]*10
+Array_gps[25];
LatA = LatA/10;
LonA=Array_gps[32]*100000+Array_gps[33]*10000+Array_gps[34]*1000
+Array_gps[35]*100+Array_gps[36]*10+Array_gps[38];
LonA = LonA/10;
Diff_lon = abs(LonA-LonB);

$$Diff\_lat = \ln \frac{\tan(latB / 2 + \pi / 4)}{\tan(latA / 2 + \pi / 4)};$$


$$\beta = \text{atan2}(\text{Diff\_lon}, \text{Diff\_lat});$$

            header_ok=0;
            index=0;
            for (i=0;i<50;i++)
                Array_gps[i]=0;
LonB=LonA;
LatB=LatA;
        }
        else
        {
            Array_gps[index]=data;
            index++;
        }
    } //header_ok=0;
}

if ((status & (FRAMING_ERROR | PARITY_ERROR | DATA_OVERRUN))==0)
{
    rx_buffer1[rx_wr_index1++]=data;
#ifdef RX_BUFFER_SIZE1 == 256
    // special case for receiver buffer size=256
    if (++rx_counter1 == 0)

```

```

    {
#else
    if (rx_wr_index1 == RX_BUFFER_SIZE1) rx_wr_index1=0;
    if (++rx_counter1 == RX_BUFFER_SIZE1)
    {
        rx_counter1=0;
#endif
        rx_buffer_overflow1=1;
    }
}
}
#pragma used+
char getchar1(void)
{
char data;
while (rx_counter1==0);
data=rx_buffer1[rx_rd_index1++];
#if RX_BUFFER_SIZE1 != 256
if (rx_rd_index1 == RX_BUFFER_SIZE1) rx_rd_index1=0;
#endif
#asm("cli")
—rx_counter1;
#asm("sei")
return data;
}
#pragma used–
// USART1 Transmitter buffer
#define TX_BUFFER_SIZE1 8
char tx_buffer1[TX_BUFFER_SIZE1];
#if TX_BUFFER_SIZE1 <= 256
unsigned char tx_wr_index1,tx_rd_index1,tx_counter1;
#else
unsigned int tx_wr_index1,tx_rd_index1,tx_counter1;
#endif
// USART1 Transmitter interrupt service routine
interrupt [USART1_TXC] void usart1_tx_isr(void)
{
if (tx_counter1)
{
—tx_counter1;
UDR1=tx_buffer1[tx_rd_index1++];
#if TX_BUFFER_SIZE1 != 256
if (tx_rd_index1 == TX_BUFFER_SIZE1) tx_rd_index1=0;
#endif
}
}
#pragma used+
void putchar1(char c)

```

```

{
while (tx_counter1 == TX_BUFFER_SIZE1);
#asm("cli")
if (tx_counter1 || ((UCSR1A & DATA_REGISTER_EMPTY)==0))
{
tx_buffer1[tx_wr_index1++]=c;
#if TX_BUFFER_SIZE1 != 256
if (tx_wr_index1 == TX_BUFFER_SIZE1) tx_wr_index1=0;
#endif
++tx_counter1;
}
else
UDR1=c;
#asm("sei")
}
#pragma used-
// Standard Input/Output functions
#include <stdio.h>
//Timer2 overflow interrupt service routine
interrupt [TIM2_OVF] void timer2_ovf_isr(void)////////////////////Kalman Filter
{
TCCR2=0x00;
if (enable==0)
{
enable=1;
x_k = xk;
P_k = Pk + Q;
next++;
if (next==100)
{
next=0;
angle=x_k;
if ((angle>360)|| (angle<0))
{
angle=0;
}
}
}
}
else
{
enable=0;
hmc58831_measur(&x,&y,&z); //update value
 $\alpha = \text{atan2}(\text{float}y, \text{float}x) * 180 / 3.14159265 + 180;$ 
 $\Psi = 0.17(\alpha + 5 * \beta)$ 
Kk = P_k / (P_k + R);
xk = x_k + Kk * ( $\Psi - x_k$ );
Pk = (1 - Kk) * P_k;
}
}

```

```

    }
    TCCR2=0x05;
}
void send_NMEA(unsigned int angle)
{
unsigned char header_NMEA[]="$HEHDT,"; //checksum 71H
unsigned char data_NMEA[4];
unsigned char middle_NMEA[]=",T*"; //checksum equal to 52H ^ 71H= 23H
unsigned char checksum_data=0;
unsigned char i=0;
unsigned char
hexa[16]={0x30,0x31,0x32,0x33,0x34,0x35,0x36,0x37,0x38,0x39,0x41,0x42,0x43,0x44,0x45
,0x46};
data_NMEA[3]=angle%10;
angle/=10;
data_NMEA[2]=angle%10;
angle/=10;
data_NMEA[1]=angle%10;
angle/=10;
data_NMEA[0]=angle%10;
i=0;
for (i=0;i<7;putchar(header_NMEA[i++]));
    putchar(data_NMEA[0]+0x30);
    putchar(data_NMEA[1]+0x30);
    putchar(data_NMEA[2]+0x30);
    putchar('.');
    putchar(data_NMEA[3]+0x30);
for (i=0;i<3;putchar(middle_NMEA[i++]));
checksum_data=0;
for (i=0;i<4;i++)
{
checksum_data^=data_NMEA[i];
}
checksum_data^=0x23;
putchar(hexa[(checksum_data >>4)&0x0f]);
putchar(hexa[checksum_data&0x0f]);
putchar(0x0d);
putchar(0x0a);
}
// Declare your global variables here
void main(void)
{
unsigned char header_GPS[]="$VK,";
unsigned char i=0;
unsigned char timer=0;
// Port A initialization
PORTA=0x00;
DDRA=0x00;

```

```
// Port B initialization
PORTB=0x00;
DDRB=0x08;
// Port C initialization
PORTC=0x00;
DDRC=0x00;
// Port D initialization
PORTD=0x04;
DDRD=0x08;
// Port E initialization
PORTE=0x02;
DDRE=0x02;
// Port F initialization
PORTF=0x00;
DDRF=0x00;
// Port G initialization
PORTG=0x00;
DDRG=0x00;
// Timer/Counter 0 initialization
ASSR=0x00;
TCCR0=0x00;
TCNT0=0x00;
OCR0=0x00;
// Timer/Counter 1 initialization
TCCR1A=0x00;
TCCR1B=0x00;
TCNT1H=0x00;
TCNT1L=0x00;
ICR1H=0x00;
ICR1L=0x00;
OCR1AH=0x00;
OCR1AL=0x00;
OCR1BH=0x00;
OCR1BL=0x00;
OCR1CH=0x00;
OCR1CL=0x00;
// Timer/Counter 2 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: 7.813 kHz
// Mode: Normal top=0xFF
// OC2 output: Disconnected
TCCR2=0x05; // 05
TCNT2=0x00;
OCR2=0x00;
// Timer/Counter 3 initialization
TCCR3A=0x00;
TCCR3B=0x00;
TCNT3H=0x00;
```

```
TCNT3L=0x00;
ICR3H=0x00;
ICR3L=0x00;
OCR3AH=0x00;
OCR3AL=0x00;
OCR3BH=0x00;
OCR3BL=0x00;
OCR3CH=0x00;
OCR3CL=0x00;
// External Interrupt(s) initialization
EICRA=0x00;
EICRB=0x00;
EIMSK=0x00;
// Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization
TIMSK=0x40; //40
ETIMSK=0x00;
// USART0 initialization
// Communication Parameters: 8 Data, 1 Stop, No Parity
// USART0 Receiver: Off
// USART0 Transmitter: On
// USART0 Mode: Asynchronous
// USART0 Baud Rate: 4800
UCSR0A=0x00;
UCSR0B=0x48;
UCSR0C=0x06;
UBRR0H=0x00;
UBRR0L=0x67;
// USART1 initialization
// Communication Parameters: 8 Data, 1 Stop, No Parity
// USART1 Receiver: On
// USART1 Transmitter: On
// USART1 Mode: Asynchronous
// USART1 Baud Rate: 9600
UCSR1A=0x00;
UCSR1B=0xD8;
UCSR1C=0x06;
UBRR1H=0x00;
UBRR1L=0x33;
// Analog Comparator initialization
ACSR=0x80;
SFIOR=0x00;
ADCSRA=0x00;
SPCR=0x00;
TWCR=0x00;
// I2C Bus initialization
i2c_init();
// Global enable interrupts
#asm("sei")
```

```

hmc5883l_init();
ENX=1;
while (1)
{
  if(timer==10)
  {
    timer=0;
    send_NMEA((int)(angle*10));
  }
  timer++;
  delay_ms(20);
}
}

```

Б. Код программы загружается в микроконтроллер АТМЕГА16 внутри цифрового устройства отображения

```

#include <mega16.h>
#include <delay.h>
//=====
unsigned long A[20];
unsigned char i,j,K, data_compassreceive =0;
unsigned char azimuth[4]={0,0,0,0};
unsigned char speed[4]={0,0,0,0};
const                unsigned                char
LED_7V[11]={0xC0,0xF9,0xA4,0xB0,0x99,0x92,0x82,0xF8,0x80,0x90,0x8E};
float angle, A, B, rotation_speed =0;
#ifndef RXB8
#define RXB8 1
#endif
#ifndef TXB8
#define TXB8 0
#endif
#ifndef UPE
#define UPE 2
#endif
#ifndef DOR
#define DOR 3
#endif
#ifndef FE
#define FE 4
#endif
#ifndef UDRE
#define UDRE 5
#endif
#ifndef RXC
#define RXC 7
#endif
#define FRAMING_ERROR (1<<FE)

```



```

#define PARITY_ERROR (1<<UPE)
#define DATA_OVERRUN (1<<DOR)
#define DATA_REGISTER_EMPTY (1<<UDRE)
#define RX_COMPLETE (1<<RXC)
// USART Receiver buffer
#define RX_BUFFER_SIZE 8
char rx_buffer[RX_BUFFER_SIZE];
#if RX_BUFFER_SIZE <= 256
unsigned char rx_wr_index,rx_rd_index,rx_counter;
#else
unsigned int rx_wr_index,rx_rd_index,rx_counter;
#endif
// This flag is set on USART Receiver buffer overflow
bit rx_buffer_overflow;
// USART Receiver interrupt service routine
interrupt [USART_RXC] void usart_rx_isr(void)
{
char status,data;
status=UCSRA;
data=UDR;
if ((status & (FRAMING_ERROR | PARITY_ERROR | DATA_OVERRUN))==0)
{
rx_buffer[rx_wr_index++]=data;
if (data=='$')
{
j=1;
A[0]=data;
}
else
if (j!=0)
{
r_data[j]=data;
j++;
if (j==5)
{
if ((A[3]=='H')&&(A[4]=='D')&&([5]=='T'))
{
data_compassreceive=1;
}
}
else
{
data_compassreceive=0;
index=0;
for (i=0;i<50;i++)
A[i]=0;
}
if (data_compassreceive ==1)

```

```

    {
    if (data==0x0d)
    {
        angle = A[7]*1000+A[8]*100+A[9]*10+A[11]; // azimuth variable
        angle=angle/10;
        A=angle;
        K=abs(A-B);
        rotation_speed =(K/200).1000 ; // rotation speed of the ship
        for (i=0;i<50;i++)
            A[i]=0;
            header_ok==0;
            j=0;
        B=A; // save the previous azimuth value
    }

    else
    {

            A[j]=data;
            j++;

    }
}

void convert(unsigned int x,unsigned int y)/// subroutine scanning 8 led 7 segments
{
unsigned int tg=0;
unsigned int az=0;
    azimuth[3]=x%10;
    tg=x/10;
    azimuth[2]=tg%10;
    tg/=10;
    azimuth[1]=tg%10;
    azimuth[0]=tg/10;
    speed[3]=y%10;
    az=y/10;
    speed[2]=az%10;
    tg/=10;
    speed[1]=az%10;
    speed[0]=az/10;
}
//-----
void scant()
{
PORTA.3=1;
PORTA.2=1;
PORTA.1=1;
PORTA.0=1;
PORTB.3=1;

```

```

PORTB.2=1;
PORTB.1=1;
PORTB.0=1;
PORTC=LED_7V[azimuth[0]]; //so hang nghin
if (LED_7V[azimuth[0]]&0x40)
    PORTB.6=1;
else
    PORTB.6=0;
PORTA.3=0;
delay_ms(K);
PORTA.3=1;
PORTC=LED_7V[azimuth[1]]; //so hang nghin
if (LED_7V[azimuth[1]]&0x40)
    PORTB.6=1;
else
    PORTB.6=0;
PORTA.2=0; //so hang tram
delay_ms(K);
PORTA.2=1;
PORTC=LED_7V[azimuth[2]]; //so hang nghin
if (LED_7V[azimuth[2]]&0x40)
    PORTB.6=1;
else
    PORTB.6=0;
PORTA.1=0; //so hang chuc
delay_ms(K);
PORTA.1=1;
PORTC=LED_7V[azimuth[3]]; //so hang nghin
if (LED_7V[azimuth[3]]&0x40)
    PORTB.6=1;
else
    PORTB.6=0;
PORTA.0=0; //so hang dv
delay_ms(K);
PORTC=LED_7V[speed[0]]; //so hang nghin
if (LED_7V[speed[0]]&0x40)
    PORTB.6=1;
else
    PORTB.6=0;
PORTB.3=0;
delay_ms(K);
PORTB.3=1;
PORTC=LED_7V[speed[1]]; //so hang nghin
if (LED_7V[speed[0]]&0x40)
    PORTB.6=1;
else
    PORTB.6=0;
PORTB.2=0;

```

```

delay_ms(K);
PORTB.2=1;
PORTC=LED_7V[speed[2]]; //so hang nghin
if (LED_7V[speed[0]]&0x40)
    PORTB.6=1;
else
    PORTB.6=0;
PORTB.1=0;
delay_ms(K);
PORTB.1=1;
PORTC=LED_7V[speed[3]]; //so hang nghin
if (LED_7V[speed[0]]&0x40)
    PORTB.6=1;
else
    PORTB.6=0;
PORTB.0=0;
delay_ms(K);
PORTB.0=1;
}
#if RX_BUFFER_SIZE == 256
    if (++rx_counter == 0)
        {
#else
    if (rx_wr_index == RX_BUFFER_SIZE) rx_wr_index=0;
    if (++rx_counter == RX_BUFFER_SIZE)
        {
            rx_counter=0;
#endif
        rx_buffer_overflow=1;
        }
    }
}

#ifndef _DEBUG_TERMINAL_IO_
#define _ALTERNATE_GETCHAR_
#pragma used+
char getchar(void)
{
char data;
while (rx_counter==0);
data=rx_buffer[rx_rd_index++];
#if RX_BUFFER_SIZE != 256
if (rx_rd_index == RX_BUFFER_SIZE) rx_rd_index=0;
#endif
asm("cli")
—rx_counter;
asm("sei")
return data;

```

```

}
#pragma used-
#endif
#define TX_BUFFER_SIZE 8
char tx_buffer[TX_BUFFER_SIZE];
#if TX_BUFFER_SIZE <= 256
unsigned char tx_wr_index,tx_rd_index,tx_counter;
#else
unsigned int tx_wr_index,tx_rd_index,tx_counter;
#endif
// USART Transmitter interrupt service routine
interrupt [USART_TXC] void usart_tx_isr(void)
{
if (tx_counter)
{
--tx_counter;
UDR=tx_buffer[tx_rd_index++];
#if TX_BUFFER_SIZE != 256
if (tx_rd_index == TX_BUFFER_SIZE) tx_rd_index=0;
#endif
}
}
#ifndef _DEBUG_TERMINAL_IO_
// Write a character to the USART Transmitter buffer
#define _ALTERNATE_PUTCHAR_
#pragma used+
void putchar(char c)
{
while (tx_counter == TX_BUFFER_SIZE);
#asm("cli")
if (tx_counter || ((UCSRA & DATA_REGISTER_EMPTY)==0))
{
tx_buffer[tx_wr_index++]=c;
#if TX_BUFFER_SIZE != 256
if (tx_wr_index == TX_BUFFER_SIZE) tx_wr_index=0;
#endif
}
++tx_counter;
}
else
UDR=c;
#asm("sei")
}
#pragma used-
#endif
// Standard Input/Output functions
#include <stdio.h>
void main(void)
{

```

```
// Declare your local variables here
// Input/Output Ports initialization
// Port A initialization
PORTA=0x00;
DDRA=0x00;
// Port B initialization
PORTB=0x01;
DDRB=0x00;
// Port C initialization
PORTC=0x00;
DDRC=0xF7;
// Port D initialization
PORTD=0x17;
DDRD=0x22;
// Timer/Counter 0 initialization
TCCR0=0x06;
TCNT0=0x00;
OCR0=0x00;
// Timer/Counter 1 initialization
TCCR1A=0x83;
TCCR1B=0x09;
TCNT1H=0x00;
TCNT1L=0x00;
ICR1H=0x00;
ICR1L=0x00;
OCR1AH=0x00;
OCR1AL=0x00;
OCR1BH=0x00;
OCR1BL=0x00;
// Timer/Counter 2 initialization
ASSR=0x00;
TCCR2=0x07;
TCNT2=0x63;
OCR2=0x00;
MCUCR=0x00;
MCUCSR=0x00;
// Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization
TIMSK=0x41;
// USART initialization
// Communication Parameters: 8 Data, 1 Stop, No Parity
// USART Receiver: On
// USART Transmitter: On
// USART Mode: Asynchronous
// USART Baud Rate: 4800
UCSRA=0x00;
UCSRB=0xD8;
UCSRC=0x86;
UBRRH=0x00;
```

```

UBRRL=0x19;
// Global enable interrupts
#asm("sei")
while (1)
{
    convert(angle,rotation_speed);
    scant();
if (PINA.5==0) //// Dimmer +
    {
        K=K+1;
        if(K==15)
            K=0;
    }
else if (PINA.6==0) ///// Dimer-
    {
        K=K-1;
        if(K==0)
            K=15;
        delay_ms(10);
    }
}

```

V. Код программы загружается в микроконтроллер ATMEGA8 внутри репитера гироскопа

```

#include <mega8.h>
#include <delay.h>
//=====
unsigned long A[20];
unsigned char i,j,K, data_compassreceive,step1 =0;
float angle =0;
#define data_step PORTC
#ifndef __MOTOR_STEP_H
#define __MOTOR_STEP_H
#include "main.h"
#include "var.h"
#define STEP_ANGLE 5.625 //goc buoc
#define S_V_RATIO 32 //ty le truyen dong
#define FULL_STEP 4 //dk full buoc
void quay(float goc);
#endif
#ifndef RXB8
#define RXB8 1
#endif
#ifndef TXB8
#define TXB8 0
#endif
#ifndef UPE
#define UPE 2
#endif

```

```

#ifndef DOR
#define DOR 3
#endif
#ifndef FE
#define FE 4
#endif
#ifndef UDRE
#define UDRE 5
#endif
#ifndef RXC
#define RXC 7
#endif
#define FRAMING_ERROR (1<<FE)
#define PARITY_ERROR (1<<UPE)
#define DATA_OVERRUN (1<<DOR)
#define DATA_REGISTER_EMPTY (1<<UDRE)
#define RX_COMPLETE (1<<RXC)
// USART Receiver buffer
#define RX_BUFFER_SIZE 8
char rx_buffer[RX_BUFFER_SIZE];
#if RX_BUFFER_SIZE <= 256
unsigned char rx_wr_index,rx_rd_index,rx_counter;
#else
unsigned int rx_wr_index,rx_rd_index,rx_counter;
#endif
// This flag is set on USART Receiver buffer overflow
bit rx_buffer_overflow;
// USART Receiver interrupt service routine
interrupt [USART_RXC] void usart_rx_isr(void)
{
char status,data;
status=UCSRA;
data=UDR;
if ((status & (FRAMING_ERROR | PARITY_ERROR | DATA_OVERRUN))==0)
{
rx_buffer[rx_wr_index++]=data;
if (data=='$')
{
j=1;
A[0]=data;
}
else
if (j!=0)
{
r_data[j]=data;
j++;
if (j==5)
{

```



```

        if ((A[3]=='H')&&(A[4]=='D')&&([5]=='T'))
            {
                data_compassreceive=1;
            }
        else
            {
                data_compassreceive=0;
                index=0;
                for (i=0;i<50;i++)
                    A[i]=0;
            }
        if (data_compassreceive ==1)
            {
                if (data==0x0d)
                    {
                        angle = A[7]*1000+A[8]*100+A[9]*10+A[11];// azimuth variable
                        angle=angle/10;
                        for (i=0;i<50;i++)
                            A[i]=0;
                        data_compassreceive ==0;
                        j=0;
                    }
                else
                    {
                        A[j]=data;
                        j++;
                    }
            }
    }
}

char data_array_f[4]={0x24,0x30,0x18,0x0c};
void quay(float goc)
{
    int temp;
    unsigned char i;
    temp= (int)goc/STEP_ANGLE;    //tinh so buoc can dieu kien
    temp=temp*S_V_RATIO;
    temp=temp/FULL_STEP;
    while(temp—)
        {
            for(i=0;i<4;i++)
                {
                    data_step=data_array_f[i];
                    delay_ms(3);
                }
        }
}

```

```

    }
#if RX_BUFFER_SIZE == 256
    // special case for receiver buffer size=256
    if (++rx_counter == 0)
    {
#else
    if (rx_wr_index == RX_BUFFER_SIZE) rx_wr_index=0;
    if (++rx_counter == RX_BUFFER_SIZE)
    {
        rx_counter=0;
#endif
    rx_buffer_overflow=1;
    }
}
#endif
#ifdef _DEBUG_TERMINAL_IO_
// Get a character from the USART Receiver buffer
#define _ALTERNATE_GETCHAR_
#pragma used+
char getchar(void)
{
    char data;
    while (rx_counter==0);
    data=rx_buffer[rx_rd_index++];
#if RX_BUFFER_SIZE != 256
    if (rx_rd_index == RX_BUFFER_SIZE) rx_rd_index=0;
#endif
    #asm("cli")
    —rx_counter;
    #asm("sei")
    return data;
}
#pragma used-
#endif
// USART Transmitter buffer
#define TX_BUFFER_SIZE 8
char tx_buffer[TX_BUFFER_SIZE];
#if TX_BUFFER_SIZE <= 256
    unsigned char tx_wr_index,tx_rd_index,tx_counter;
#else
    unsigned int tx_wr_index,tx_rd_index,tx_counter;
#endif
// USART Transmitter interrupt service routine
interrupt [USART_TXC] void usart_tx_isr(void)
{
    if (tx_counter)
    {
        —tx_counter;
    }
}

```

```

    UDR=tx_buffer[tx_rd_index++];
#if TX_BUFFER_SIZE != 256
    if (tx_rd_index == TX_BUFFER_SIZE) tx_rd_index=0;
#endif
}
}
#endif _DEBUG_TERMINAL_IO_
// Write a character to the USART Transmitter buffer
#define _ALTERNATE_PUTCHAR_
#pragma used+
void putchar(char c)
{
    while (tx_counter == TX_BUFFER_SIZE);
    #asm("cli")
    if (tx_counter || ((UCSRA & DATA_REGISTER_EMPTY)==0))
    {
        tx_buffer[tx_wr_index++]=c;
#if TX_BUFFER_SIZE != 256
        if (tx_wr_index == TX_BUFFER_SIZE) tx_wr_index=0;
#endif
        ++tx_counter;
    }
    else
        UDR=c;
    #asm("sei")
}
#pragma used-
#endif
// Standard Input/Output functions
#include <stdio.h>
// Timer 0 overflow interrupt service routine
//=====
void main(void)
{
    // Declare your local variables here
    // Input/Output Ports initialization
    // Port A initialization
    PORTA=0x00;
    DDRA=0x00;
    // Port B initialization
    PORTB=0x01;
    DDRB=0x00;
    // Port C initialization
    PORTC=0x00;
    DDRC=0xF7;
    // Port D initialization
    PORTD=0x17;
    DDRD=0x22;

```

```

// Timer/Counter 0 initialization
TCCR0=0x06;
TCNT0=0x00;
OCR0=0x00;
// Timer/Counter 1 initialization
TCCR1A=0x83;
TCCR1B=0x09;
TCNT1H=0x00;
TCNT1L=0x00;
ICR1H=0x00;
ICR1L=0x00;
OCR1AH=0x00;
OCR1AL=0x00;
OCR1BH=0x00;
OCR1BL=0x00;
// Timer/Counter 2 initialization
ASSR=0x00;
TCCR2=0x07;
TCNT2=0x63;
OCR2=0x00;
// External Interrupt(s) initialization
MCUCR=0x00;
MCUCSR=0x00;
// Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization
TIMSK=0x41;
// USART initialization
// Communication Parameters: 8 Data, 1 Stop, No Parity
// USART Receiver: On
// USART Transmitter: On
// USART Mode: Asynchronous
// USART Baud Rate: 4800
UCSRA=0x00;
UCSRB=0xD8;
UCSRC=0x86;
UBRRH=0x00;
UBRRL=0x19;
ACSR=0x80;
SFIOR=0x00;
ADMUX=ADC_VREF_TYPE & 0xff;
ADCSRA=0x84;
SPCR=0x00;
TWCR=0x00;
lcd_init(16);
// Global enable interrupts
#asm("sei")
unsigned char zero_point=0;
zero_point= PIND.3;
while(zero_point!=0) //// the program returns the needle to zero at the beginning

```

```

    {
        quay(0);
        zero_point= PIND.3;
    }
while (1)
    {
    quay(angle);    //// Rotate the stepper motor to the current azimuth position
    }

```

Приложение 2. Программный код, написанный в ОП С#, для тестирования ЦМК

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;
using System.IO;
using ZedGraph;
namespace Training
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        public class var
        {
            public static List<string> data = new List<string>();
            public static List<string> data1 = new List<string>();
            public static List<string> t = new List<string>();
        }

        public delegate void InvokeDelegate();
        public Form1()
        {
            InitializeComponent();
        }

        private void on_com(object sender, System.IO.Ports.SerialDataReceivedEventArgs e)
        {
            BeginInvoke(new InvokeDelegate(updateText));
        }
        string data;
        int dem=0;
        string dulieu="";
        private void updateText()
        {

```

```

//du lieu nhan
string tmp = serialPort1.ReadExisting();
int i;
string chuoi;
data += tmp;
for (i = 0; i < data.Length; i++) //kiem tra ki tu bat dau
{
    if (data.Substring(i, 1) == "$") //tim byte bat dau cua do
    {
        if (i != 0)
        {
            //co chuoi thua
            chuoi = data.Substring(i, data.Length - i); //loai bo cac ki tu thua o dau chuoi ra
            data = chuoi; //chuoi moi bat dau '('
        }
        //kiem tra byte o vi tri thu 17
        if (data.Length > 20)
        {
            chuoi = data.Substring(18, 1)
            if (chuoi == "\n")
            {
                //cat 20 byte
                chuoi = data.Substring(0, 19);
                string[] str = chuoi.Split(',');
                textBox1.Text = str[1];
                data = ""; // chuoi da loai di 20 byte cua la ban so
            }
            else
            {
                chuoi = data.Substring(20, 1)           data = chuoi;
                break;
            }
        }
    }
}

private void save_file(string filePath)
{
    try
    {
        FileStream cfile = new FileStream(filePath, FileMode.Create);
        StreamWriter wr = new StreamWriter(cfile, Encoding.UTF8);
        string data = "";
        for (int i = 0; i < var.t.Count; i++)
        {
            data += var.t[i] + ",";
        }
    }
}

```

```

        wr.Write(data);
        wr.Close();
    }
    catch (Exception) { }
}
//
private string open_file(string filePath)
{
    string data = "";
    try
    {
        FileStream old = new FileStream(filePath, FileMode.Open );
        StreamReader rd = new StreamReader(old, Encoding.UTF8);
        data = rd.ReadToEnd();
        rd.Close();
    }
    catch (Exception) { };
    return data;
}
//
private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (!serialPort1.IsOpen)
        serialPort1.Open();
    var.data.Clear();
    var.data1.Clear();
    dem = 0;
    timStick.Enabled = true;
}

private void button2_Click(object sender, EventArgs e)
{
    // tim_send.Enabled = false;
    timStick.Enabled = false;
}

private void button3_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (serialPort1.IsOpen)
        serialPort1.Close();
    // this.Close();
    Application.Exit();
}

private void button4_Click(object sender, EventArgs e)
{

```

```

int i;
for (i = 0; i < 850; i++)
{
    var.t.Add(i.ToString ());
}
save_file("E:\\data.txt");
}
private void Form1_Load(object sender, EventArgs e)
{
    //khoi tao do thi
    GraphPane myPane = zed1.GraphPane;
    myPane.Title.Text = "Direction Indicator";
    myPane.XAxis.Title.Text = "Second (s)";
    myPane.YAxis.Title.Text = "Angle ";
    //myPane.YAxis.Scale.Min = -60; // Min = 0;
    //myPane.YAxis.Scale.Max = 60; // Mã = 30;
    zed1.AxisChange();
}
private void button5_Click(object sender, EventArgs e)
{
    //mo file va ve
    string[] data=new string[851];
    string[] time=new string[851];
    //doc du lieu
    OpenFileDialog dlg = new OpenFileDialog();
    dlg.InitialDirectory = @"C:\Users\Tien\Desktop\Hau\Ve dac tinh co – Copy";
    dlg.Title = "Read Data";
    if (dlg.ShowDialog() == DialogResult.OK)
    {
        string filename;
        filename = dlg.FileName;
        data = open_file(filename).Split(',');
    }
    dlg.Title = "Read Time";

    if (dlg.ShowDialog() == DialogResult.OK)
    {
        string filename;
        filename = dlg.FileName;
        time= open_file(filename).Split(',');
    }
    GraphPane myPane;
    PointPairList list1;
    LineItem myCurve1;
    int leng = 851;
    double[] goc = new double[leng];
    Random rd = new Random();
    double num_ran = rd.Next(- 550, 1450);

```



```

double[] thoi_gian = new double[leng];
for (int k = 0; k < leng; k++)
{
    goc[k] = (double.Parse(data[k]) - 179);
    thoi_gian[k] = double.Parse(time[k]);
}
for (int k = 740; k < 850; k++)
{
    goc[k] -= 2;
}
// zed1.GraphPane.CurveList.Clear();
myPane = zed1.GraphPane;
myPane.XAxis.Scale.Min = 0; // Min = 0;
myPane.XAxis.Scale.Max = 851; // Min = 0;
myPane.YAxis.Scale.Min = -50; // Min = 0;
myPane.YAxis.Scale.Max = 50; // Min = 0;
list1 = new PointPairList(thoi_gian , goc);

myCurve1 = myPane.AddCurve("GPS+HMC5883", list1, Color.Red,
SymbolType.None);
zed1.AxisChange();
zed1.Invalidate();
zed1.Refresh();
}
}

int x = 0;
private void timStick_Tick(object sender, EventArgs e)
{
    var.data.Add(textBox1.Text);
    textBox2.Text = x.ToString();
    x += 1;
    if (x >= 850)
        timStick.Enabled = false;
}

private void button7_Click(object sender, EventArgs e)
{
    double[] set_v = new double[851];
    double[] set_t = new double[851];
    for (int i = 0; i < 200; i++)
    {
        set_v[i] = 0;
    }
    for (int i = 200; i < 400; i++)
    {
        set_v[i] += (i - 200) / 10;
    }
}

```

```

for (int i = 400; i < 560; i++)
{
    set_v[i] = 20;
}
for (int i = 560; i < 760; i++)
{
    set_v[i] = 20 + (i - 560) / 10; ;
}
for (int i = 760; i < 851; i++)
{
    set_v[i] = 40;
}
//
for (int i = 0; i < 851; i++)
{
    set_t[i] = i;
}
GraphPane myPane;
PointPairList list1;
LineItem myCurve1;
int leng = 851;
double[] goc = new double[leng];
double[] thoi_gian = new double[leng];
myPane = zed1.GraphPane;
myPane.XAxis.Scale.Min = 0; // Min = 0;
myPane.XAxis.Scale.Max = 851; // Min = 0;
myPane.YAxis.Scale.Min = -50; // Min = 0;
myPane.YAxis.Scale.Max = 50; // Min = 0;
list1 = new PointPairList(set_t, set_v);
myCurve1 = myPane.AddCurve("Set-Angle", list1, Color.Blue , SymbolType.None);
zed1.AxisChange();
zed1.Invalidate();
zed1.Refresh();
}
}
}

```

Приложение 3. Протокол испытаний ЦМКС

А. Протокол компании <<Thao Linh, Viet Nam>>

TEST RESULTS AND ASSESSMENT OF THE DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM

The quality of the digital magnetic compass system from designed by **Hau Vu Xuan**, PhD student is evaluated based on technical parameters including accuracy, heat resistance (high temperature, low), vibration, watertight and insulating resistance.

In order to perform the test and evaluation of the above parameters, the author sent the system to Thao Linh DMTCO.,Ltd. The company then tested and measured the system on the ship. After a period of 15 days, September 2, 2017, the company paid the test results, the results are as follows:

1. Experimental results measured

1.1. About precision

The results of the verification of the accuracy of the system are shown in Table 1 as follows:

Table 1. Test results on the accuracy of the system

Indicator on the standard compass (degrees)	Indicator on the compass of the system (degrees)	Error (degrees)	Results
0.0	0.3	0.3	Pass
128.5	128.9	0.4	Pass
250.1	250.6	0.5	Pass
338.4	338.8	0.4	Pass
360	359.5	0.5	Pass
90,1	90,5	0.4	Pass
80,5	80,9	0.4	Pass
45	45.4	0.4	Pass
50.5	50.9	0.4	Pass
30	30.5	0.5	Pass

1.2. High temperature resistance

To assess the high temperature (dry), the company has tested the system at a temperature of 70 degrees C, for a period of 12 hours. The test results are shown in Table 2 as follows:

Table 2. Test results for high temperatures at 70 degrees C

Indicator on the standard compass (degrees)	Indicator on the compass of the system (degrees)	Error (degrees)	Results
0.0	0.4	0.4	Pass
137.5	138.1	0.6	Pass
234.1	234.7	0.6	Pass
351.7	352.2	0.5	Pass

1.3. Ability to withstand humidity

To evaluate the moisture resistance, the company tested the system at a temperature of 60 degrees and a humidity of 93% over a 12 hour period. The test results are shown in Table 3 as follows:

Table 3. Test results at 60 degrees, humidity 93%

Indicator on the standard compass (degrees)	Indicator on the compass of the system (degrees)	Error (degrees)	Results
0.0	0.3	0.3	Pass
128.4	128.8	0.4	Pass
234.1	234.2	0.1	Pass
332.4	332.6	0.2	Pass

1.4. Low temperature resistance

To assess its low temperature resistance, the company tested the system at -250 degree (C) for a 12-hour period. The test results are shown in Table 4 as follows:

Table 4. Results at low temperatures -25 degrees



Indicator on the standard compass (degrees)	Indicator on the compass of the system (degrees)	Error (degrees)	Results
0.0	0.5	0.5	Pass
90.4	90.8	0.4	Pass
200.1	200.3	0.2	Pass
347.4	347.9	0.5	Pass

1.5. Vibration tolerance

To evaluate the vibration tolerance, the company tested the system at 30Hz, amplitude ± 1 mm, for a period of two hours. The test results are shown in Table 5 as follows:

Table 5. Test results on vibration resistance 30Hz, ± 1 mm amplitude

Indicator on the standard compass (degrees)	Indicator on the compass of the system (degrees)	Error (degrees)	Results
0.0	0.6	0.6	Pass
121.0	120.3	0.7	Pass
264.9	264.0	0.9	Pass
357.4	358.2	0.8	Pass

1.6. Check the insulation resistance

The company has made insulation measurements of the system as required $> 1000\Omega$. Standard results.

1.7. Water tightness test for needle facing

The company has implemented a waterproof test for needle-faced surfaces on IPX6 requirements. Standard results.

2. Conclusion

Via the above tables, the digital magnetic compass system, from researcher **Hau Vu Xuan** studying design and manufacturing, has met the standards of a compass system from underwater. The system is made of beautiful aesthetics, can operate with harsh environment in the sea. The magnetic compass is programmed using the Kalman filter to have good noise resistance. The system has been deployed for use the ship and for good results

Hai Phong on September 2, 2017

Representative of Thao Linh DMTCO.,Ltd



[Signature]
GIÁM ĐỐC
Vũ Thị Ngọc Tuyết

Representative shipowners experiment and measure



Captain :
Hà
Nguyễn Hải Hà

8844
IG T
IEM HC
VCON
IGH
OLIP
-T.T.Y

CTINA
HẠN
NGHỆ
HẢI PHÒNG

Б. Протокол компании <<MTS, Viet Nam>>

TEST RESULTS AND ASSESSMENT OF THE DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM

The quality of the digital magnetic compass system designed by **Hau Vu Xuan**, PhD student is evaluated based on technical parameters including accuracy, heat resistance (high temperature, low), vibration, watertight and insulating resistance.

In order to perform the test and evaluation of the above parameters, the author sent the system to **Maritime Trading and Service Technology Co., Ltd (MTS)**. The company then tested and measured the system on the ship. After a period of 15 days, August 2, 2017, the company paid the test results, the results are as follows:

1. Experimental results measured

1.1. About precision

The results of the verification of the accuracy of the system are shown in Table 1 as follows:

Table 1. Test results on the accuracy of the system

Indicator on the standard compass (degrees)	Indicator on the compass of the system (degrees)	Error (degrees)	Results
0.5	0.8	0.3	Pass
10	10.4	0.4	Pass
20	20.5	0.5	Pass
30	30.4	0.4	Pass
30.5	31	0.5	Pass
45	45.4	0.4	Pass
80.5	80,9	0.4	Pass
360	0.4	0.4	Pass
90	90.3	0.3	Pass
67	66.5	0.5	Pass



1.2. High temperature resistance

To assess the high temperature (dry), the company has tested the system at a temperature of 60 degrees C, for a period of 12 hours. The test results are shown in Table 2 as follows:

Table 2. Test results for high temperatures at 60 degrees C

Indicator on the standard compass (degrees)	Indicator on the compass of the system (degrees)	Error (degrees)	Results
90	90.4	0.4	Pass
120.5	121.1	0.6	Pass
2.1	2.7	0.6	Pass
90.7	91.2	0.5	Pass

1.3. Ability to withstand humidity

To evaluate the moisture resistance, the company tested the system at a temperature of 60 degrees and a humidity of 93% over a 12 hour period. The test results are shown in Table 3 as follows:

Table 3. Test results at 60 degrees, humidity 93%

Indicator on the standard compass (degrees)	Indicator on the compass of the system (degrees)	Error (degrees)	Results
360	0.3	0.3	Pass
180	180.4	0.4	Pass
20	20.1	0.1	Pass
3.4	3.6	0.2	Pass

1.4. Low temperature resistance

To assess its low temperature resistance, the company tested the system at -250 degree (C) for a 12-hour period. The test results are shown in Table 4 as follows:



Table 4. Results at low temperatures -25 degrees

Indicator on the standard compass (degrees)	Indicator on the compass of the system (degrees)	Error (degrees)	Results
0.0	0.5	0.5	Pass
45	45.4	0.4	Pass
100	100.3	0.2	Pass
200,5	201	0.5	Pass

1.5. Vibration tolerance

To evaluate the vibration tolerance, the company tested the system at 30Hz, amplitude ± 1 mm, for a period of two hours. The test results are shown in Table 5 as follows:

Table 5. Test results on vibration resistance 30Hz, ± 1 mm amplitude

Indicator on the standard compass (degrees)	Indicator on the compass of the system (degrees)	Error (degrees)	Results
0.0	0.4	0.4	Pass
100.0	100.4	0.4	Pass
30	30.9	0.9	Pass
60	60.8	0.8	Pass

1.6. Check the insulation resistance

The company has made insulation measurements of the system as required $> 1000\Omega$. Standard results.

1.7. Water tightness test for needle facing

The company has implemented a waterproof test for needle-faced surfaces on IPX6 requirements. Standard results.

2. Conclusion

Via the above tables, the digital magnetic compass system , from researcher **Hau Vu Xuan** studying design and manufacturing, has met the standards of a

compass system from underwater. The system is made of beautiful aesthetics, can operate with harsh environment in the sea. The system has been deployed for use the ship and for good results

Hai Phong on August 2, 2017

Representative of **Maritime Trading and Service Technology Co., Ltd.**
(MTS)



Msc. NGUYEN NGOC SON

Representative shipowners experiment and measure



Captain:
[Signature]
Nguyễn Hải Hà

ICE
S
DT

CHNOL
067 C

Приложение 4. Экспериментальные результаты испытаний ЦМКС

Table of empirical data of the DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM, When using Kalmand filter, the Ship is moving around 186 degrees

Timer	Angle measured
11:36:19	185,70
11:36:21	185,70
11:36:22	185,70
11:36:24	185,70
11:36:26	186,20
11:36:27	186,20
11:36:29	186,20
11:36:30	186,20
11:36:32	186,20
11:36:33	186,40
11:36:35	186,40
11:36:36	186,40
11:36:38	186,40
11:36:39	186,40
11:36:41	186,40
11:36:42	186,40
11:36:44	186,40
11:36:45	186,40
11:36:47	186,10
11:36:48	186,10
11:36:50	186,10
11:36:52	186,10
11:36:53	186,10
11:36:55	186,10
11:36:56	186,10
11:36:58	186,10
11:36:59	186,10
11:37:01	186,10
11:37:02	186,10
11:37:04	186,10

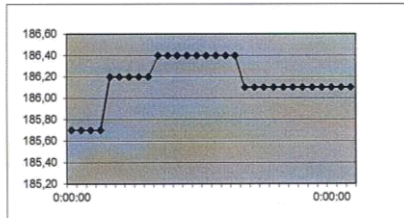


Table of empirical data of the DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM, When using Kalmand filter, the Ship is moving around 137 degrees

Timer	Angle measured
11:16:12	137,50
11:16:27	137,50
11:16:29	137,50
11:16:30	137,50
11:16:32	137,50
11:16:33	137,50
11:16:35	137,50
11:16:37	137,50
11:16:38	137,50
11:16:39	137,50
11:16:41	137,50
11:16:43	137,50
11:16:44	137,50
11:16:46	137,50
11:16:47	136,50
11:16:49	136,50
11:16:50	136,50
11:16:52	136,50
11:16:53	136,50
11:16:55	136,50
11:16:56	136,50
11:16:58	136,50
11:16:00	136,50
11:16:01	136,50
11:16:03	136,50
11:16:04	136,50
11:16:06	136,50
11:16:07	136,50
11:16:09	136,50
11:16:10	136,50

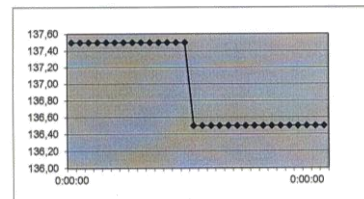


Table of empirical data of the DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM, When using Kalmand filter, the Ship is moving around 92 degrees

Timer	Angle measured
11:11:34	91,80
11:11:35	91,80
11:11:37	91,80
11:11:38	91,80
11:11:40	91,80
11:11:41	91,80
11:11:43	92,50
11:11:45	92,50
11:11:46	92,50
11:11:48	92,50
11:11:49	92,50
11:11:51	92,50
11:11:52	92,50
11:11:54	92,50
11:11:55	92,50
11:11:57	92,50
11:11:58	92,50
11:12:00	92,50
11:12:02	92,50
11:12:03	92,40
11:12:05	92,40
11:12:06	92,40
11:12:08	92,40
11:12:09	91,60
11:12:11	91,60
11:12:12	91,60
11:12:14	91,60
11:12:15	91,60
11:12:17	91,60
11:12:18	91,60

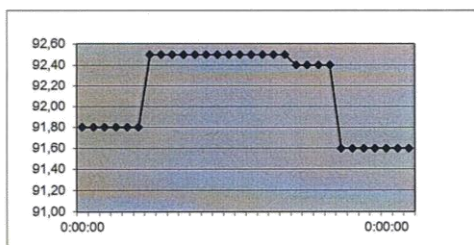


Table of empirical data of the DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM (When not using Kalmand filter, the Ship is standing at 0,7 degrees)

Timer	Angle measured
12:17:54	2,00
12:17:55	2,10
12:17:57	0,50
12:17:58	0,10
12:18:00	2,00
12:18:02	2,10
12:18:03	2,20
12:18:05	2,10
12:18:06	2,10
12:18:08	2,10
12:18:09	2,10
12:18:11	2,10
12:18:12	2,10
12:18:14	2,10
12:18:16	0,70
12:17:34	0,70
12:17:35	0,70
12:17:37	0,70
12:17:38	0,70
12:17:40	0,70
12:17:41	0,70
12:17:43	1,00
12:17:45	1,00
12:17:46	1,00
12:17:48	1,00
12:17:49	1,00
12:17:51	1,00
12:17:52	1,00
12:13:59	1,00
12:14:01	1,00

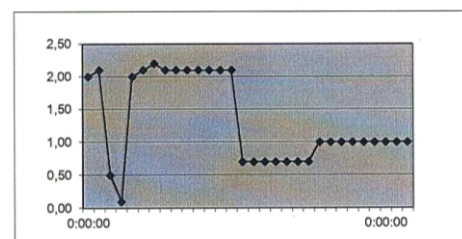


Table of empirical data of the DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM (When not using Kalmand filter, the Ship is standing at 20 degrees)

Timer	Angle measured
12:06:18	22,00
12:06:20	18,50
12:06:21	21,00
12:06:23	21,50
12:06:24	20,30
12:06:26	20,50
12:06:27	20,50
12:06:29	20,50
12:06:30	20,50
12:06:32	20,50
12:06:33	20,50
12:06:35	20,50
12:06:37	20,50
12:06:38	21,10
12:06:40	21,10
12:06:41	21,10
12:06:43	21,10
12:06:44	21,10
12:06:46	21,10
12:05:53	21,10
12:05:55	22,20
12:05:56	22,20
12:05:58	22,20
12:05:59	22,20
12:06:01	22,20
12:06:02	22,20
12:06:04	22,20
12:06:06	22,20
12:06:07	22,20
12:06:09	22,20

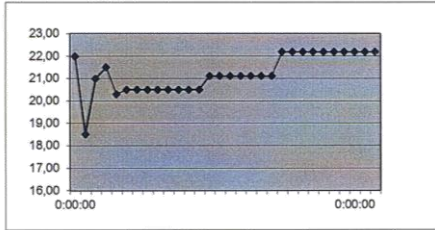


Table of empirical data of the DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM (When not using Kalmand filter, the Ship is standing at 95,8 degrees)

Timer	Angle measured
12:14:02	96,50
12:13:17	96,50
12:13:19	96,50
12:13:20	96,50
12:13:22	96,50
12:13:24	96,50
12:13:25	96,50
12:13:27	96,50
12:13:28	96,50
12:13:30	94,00
12:13:31	94,00
12:13:33	94,00
12:13:34	94,00
12:13:36	94,00
12:13:37	94,00
12:13:39	95,50
12:13:41	95,50
12:13:42	95,50
12:13:44	95,50
12:13:45	95,50
12:13:47	95,50
12:13:48	95,50
12:13:50	94,00
12:13:51	94,00
12:13:53	94,00
12:13:54	94,00
12:13:56	94,00
12:13:57	94,00
12:13:59	94,00
12:14:01	94,00

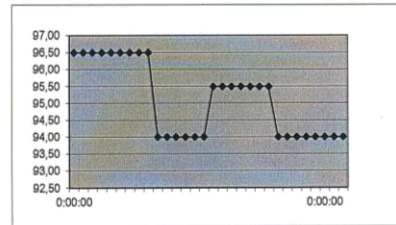


Table of empirical data of the DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM (When not using Kalmand filter, the Ship is standing at 133,5 degrees)

Timer	Angle measured
12:03:13	135,00
12:03:14	135,00
12:03:16	135,00
12:03:17	135,00
12:03:19	135,00
12:03:20	135,00
12:03:22	134,20
12:03:23	134,20
12:03:25	134,20
12:03:26	134,20
12:03:28	134,20
12:03:30	134,20
12:03:31	134,20
12:03:33	134,20
12:03:34	134,20
12:03:36	132,50
12:03:37	132,50
12:02:52	132,50
12:02:54	132,50
12:02:55	132,50
12:02:57	132,50
12:02:59	133,00
12:03:00	133,00
12:03:02	133,00
12:03:03	133,00
12:03:05	133,00
12:03:06	133,70
12:03:08	133,70
12:03:09	133,70
12:03:11	133,70

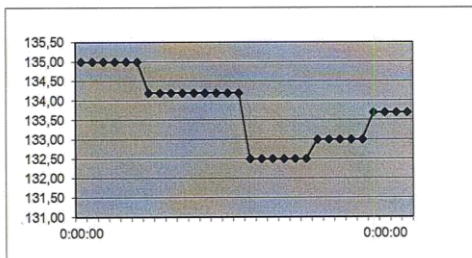


Table of empirical data of the DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM (When not using Kalmand filter, the Ship is standing at 228,3 degrees)

Timer	Angle measured
12:10:57	229,00
12:10:58	229,00
12:10:13	229,00
12:10:15	229,00
12:10:16	229,00
12:10:18	227,10
12:10:19	227,10
12:10:21	227,10
12:10:23	227,10
12:10:24	227,10
12:10:26	227,10
12:10:27	227,10
12:10:29	228,20
12:10:30	228,20
12:10:32	228,20
12:10:33	228,20
12:10:35	230,00
12:10:36	230,00
12:10:38	230,00
12:10:40	230,00
12:10:41	227,20
12:10:43	227,20
12:10:44	227,20
12:10:46	227,90
12:10:47	227,90
12:10:57	227,90
12:10:57	227,90
12:10:57	227,90
12:10:57	227,90
12:10:57	227,90
12:10:57	227,90

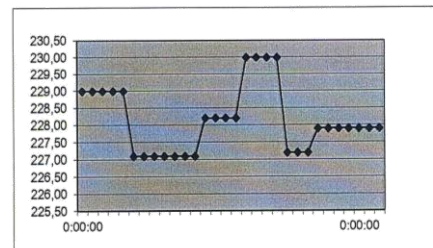


Table of empirical data of the DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM (When not using Kalmand filter, the Ship is moving around 225 degrees)

11:11:47	223,50
11:11:49	223,50
11:11:51	222,70
11:11:52	222,70
11:11:54	224,90
11:11:55	224,90
11:11:57	228,10
11:11:58	228,10
11:12:00	227,10
11:12:01	227,10
11:12:03	225,10
11:12:04	225,10
11:12:06	223,40
11:12:08	223,40
11:12:09	223,70
11:12:11	223,70
11:12:12	224,40
11:12:14	224,40
11:12:15	222,70
11:12:17	222,70
11:11:32	223,70
11:12:20	221,70
11:12:21	221,50
11:12:23	221,50
11:12:25	218,90
11:12:26	218,90
11:12:28	221,10
11:12:29	221,10
11:12:31	222,40
11:12:32	222,40

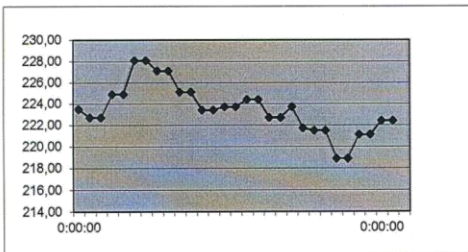
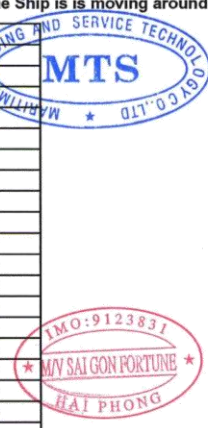


Table of empirical data of the DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM (When not using Kalmand filter, the Ship is moving around 137 degrees)

11:03:19	135,20
11:03:21	135,20
11:03:23	135,30
11:03:24	135,30
11:03:26	136,80
11:03:27	139,10
11:03:29	139,10
11:03:30	138,00
11:03:32	138,00
11:03:33	136,90
11:03:35	136,90
11:03:36	136,20
11:03:38	136,20
11:03:40	136,20
11:03:41	136,20
11:03:43	134,70
11:03:44	134,70
11:03:46	136,90
11:03:47	136,90
11:03:49	135,40
11:03:50	135,40
11:03:52	136,60
11:03:53	136,60
11:03:55	137,70
11:03:57	137,70
11:03:58	138,30
11:04:00	138,30
11:04:01	136,40
11:04:03	136,40
11:03:18	135,10
11:16:10	136,50

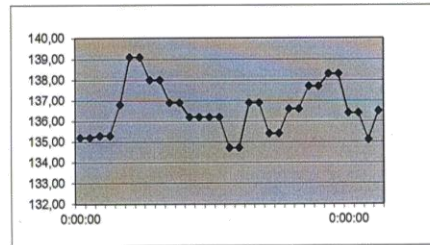
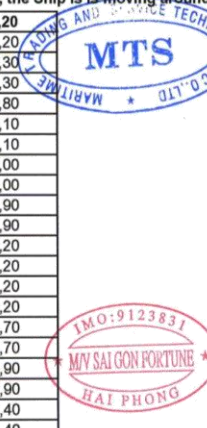


Table of empirical data of the DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM (When not using Kalmand filter, the Ship is moving around 186 degrees)

11:08:43	186,60
11:08:45	185,00
11:08:46	185,00
11:08:48	185,30
11:08:50	185,30
11:08:05	187,30
11:08:07	185,10
11:08:08	185,10
11:08:10	184,80
11:08:11	184,80
11:08:13	187,20
11:08:14	187,20
11:08:16	184,70
11:08:17	184,70
11:08:19	186,50
11:08:20	186,50
11:08:22	184,60
11:08:24	184,60
11:08:25	184,90
11:08:27	184,90
11:08:28	187,20
11:08:30	187,20
11:08:31	185,30
11:08:33	187,30
11:08:34	187,30
11:08:36	186,40
11:08:37	186,40
11:08:39	187,80
11:08:40	187,80
11:08:42	186,60

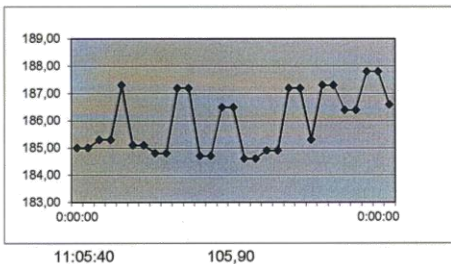
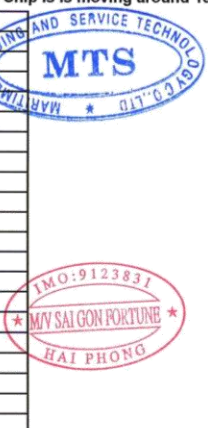


Table of empirical data of the DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM (When not using Kalmand filter, the Ship is moving around 92 degrees)

10:23:56	93,10
10:23:11	99,00
10:23:12	99,00
10:23:14	99,00
10:23:15	99,00
10:23:17	96,50
10:23:18	96,50
10:23:20	95,50
10:23:22	95,50
10:23:23	93,00
10:23:25	93,00
10:23:26	88,60
10:23:28	88,60
10:23:29	87,30
10:23:31	87,30
10:23:32	88,40
10:23:34	88,40
10:23:35	87,90
10:23:37	89,80
10:23:39	89,80
10:23:40	89,50
10:23:42	89,50
10:23:43	90,70
10:23:45	90,70
10:23:46	91,90
10:23:48	91,90
10:23:49	92,90
10:23:51	92,90
10:23:52	92,70
10:23:54	92,70
11:12:18	91,60

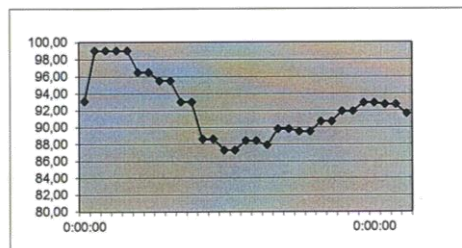


Table of empirical data of the DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM (When not using Kalmand filter, the Ship is moving around 33 degrees)

10:21:36	33,60
10:20:51	36,60
10:20:53	36,90
10:20:55	36,30
10:20:56	35,80
10:20:58	35,80
10:20:59	34,40
10:21:01	34,40
10:21:02	33,60
10:21:04	33,60
10:21:05	33,40
10:21:07	33,40
10:21:08	32,60
10:21:10	32,60
10:21:12	29,40
10:21:13	29,40
10:21:15	31,70
10:21:16	36,60
10:21:18	36,60
10:21:19	26,90
10:21:21	26,90
10:21:22	29,70
10:21:24	29,70
10:21:25	31,10
10:21:27	31,10
10:21:29	32,60
10:21:30	32,60
10:21:32	33,50
10:21:33	33,50
10:21:35	33,60
11:40:09	32,80

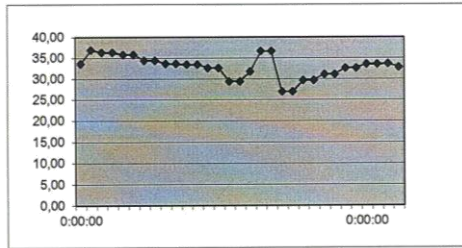


Table of empirical data of the DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM (When using Kalmand filter, the Ship is standing at 228,3 degrees)

Timer	Angle measured
10:41:26	228,30
10:41:28	228,30
10:41:29	228,30
10:41:31	228,30
10:40:46	228,30
10:40:48	228,30
10:40:49	228,30
10:40:51	228,30
10:40:52	228,30
10:40:54	228,30
10:40:55	228,30
10:40:57	228,30
10:40:59	228,30
10:41:00	228,30
10:41:02	228,30
10:41:03	228,30
10:41:05	228,30
10:41:06	228,30
10:41:08	228,30
10:41:09	228,30
10:41:11	228,30
10:41:12	228,30
10:41:14	228,10
10:41:15	228,10
10:41:17	228,30
10:41:19	228,30
10:41:20	227,50
10:41:22	227,50
10:41:23	228,80
10:41:25	228,80

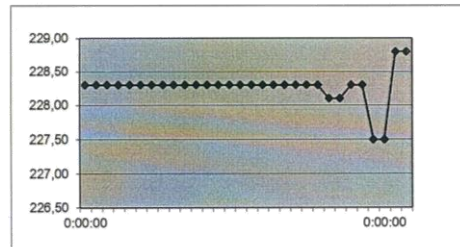
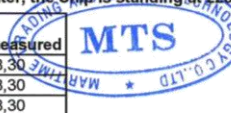


Table of empirical data of the DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM, When using Kalmand filter, the Ship is moving around 225 degrees

Timer	Angle measured
11:04:36	225,50
11:03:51	225,50
11:03:53	225,50
11:03:54	225,50
11:03:56	225,50
11:03:57	225,50
11:03:59	225,50
11:04:00	225,50
11:04:02	225,50
11:04:03	225,50
11:04:05	224,50
11:04:07	224,50
11:04:08	224,50
11:04:11	224,50
11:04:11	224,50
11:04:13	224,90
11:04:14	224,90
11:04:16	224,90
11:04:17	224,90
11:04:19	224,90
11:04:20	224,90
11:04:22	224,90
11:04:23	224,90
11:04:25	224,90
11:04:27	224,90
11:04:28	225,70
11:04:30	225,70
11:04:31	225,70
11:04:33	225,70
11:04:34	225,70

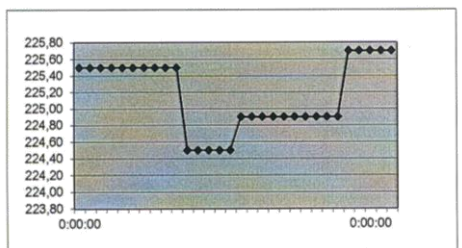


Table of empirical data of the DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM (When not using Kalmand filter, the Ship is moving around 2 degrees)

10:18:32	0,90
10:17:47	5,50
10:17:49	5,50
10:17:50	5,50
10:17:52	5,50
10:17:53	4,60
10:17:55	4,60
10:17:57	3,90
10:17:58	3,90
10:18:00	3,10
10:18:01	3,10
10:18:03	2,70
10:18:04	2,70
10:18:06	2,80
10:18:07	2,80
10:18:09	2,40
10:18:10	2,40
10:18:12	2,00
10:18:13	2,00
10:18:15	1,70
10:18:16	1,70
10:18:18	1,10
10:18:19	1,40
10:18:21	1,40
10:18:23	0,90
10:18:24	0,90
10:18:26	1,00
10:18:27	1,00
10:18:29	0,80
10:18:30	0,80
11:40:09	2,20

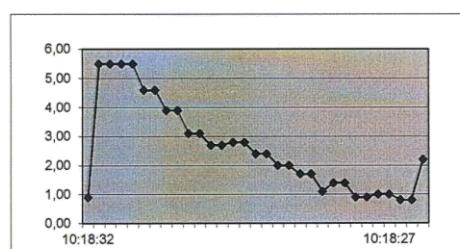


Table of empirical data of the DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM (When using Kalmand filter, the Ship is standing at 0,7 degrees)

Timer	Angle measured
10:59:13	0,70
10:59:15	0,70
10:59:16	0,70
10:59:18	0,60
10:59:19	0,60
10:59:21	0,60
10:59:22	0,60
10:59:24	0,70
10:59:26	0,70
10:59:27	0,70
10:59:29	0,70
10:59:30	0,70
10:59:32	0,70
10:59:33	0,60
10:59:35	0,60
10:59:36	0,70
10:59:38	0,70
10:59:39	0,70
10:59:41	0,70
10:59:42	0,60
10:59:44	0,60
10:59:45	0,60
10:59:47	0,60
10:59:48	0,70
10:59:50	0,70
10:59:52	0,70
10:59:53	0,70
10:59:55	0,60
10:59:56	0,60
10:59:58	0,70

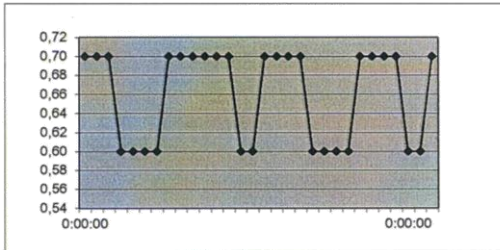


Table of empirical data of the DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM (When using Kalmand filter, the Ship is standing at 20 degrees)

Timer	Angle measured
10:36:04	19,90
10:36:05	19,90
10:36:07	19,90
10:36:08	19,90
10:36:10	19,90
10:36:12	19,90
10:36:13	19,90
10:36:15	20,00
10:36:16	20,00
10:36:18	19,90
10:36:19	19,90
10:36:21	20,00
10:36:22	20,00
10:36:24	20,00
10:36:25	20,00
10:36:27	20,00
10:36:28	20,00
10:36:30	20,00
10:36:31	20,00
10:36:33	19,90
10:36:34	19,90
10:36:36	19,90
10:36:38	19,90
10:36:39	19,90
10:36:41	19,90
10:36:42	19,90
10:36:44	20,00
10:36:45	20,00
10:36:47	19,90
10:36:48	19,90

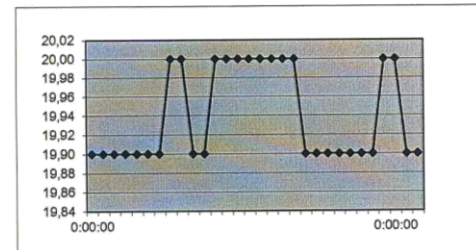


Table of empirical data of the DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM (When using Kalmand filter, the Ship is standing at 95,8 degrees)

Timer	Angle measured
10:22:27	95,80
10:22:29	95,80
10:22:30	95,80
10:23:18	95,70
10:23:20	95,70
10:22:35	95,80
10:24:10	95,80
10:24:11	95,80
10:24:12	95,80
10:24:14	95,80
10:24:15	95,80
10:24:17	95,80
10:24:18	95,80
10:24:20	95,90
10:24:21	95,80
10:24:23	95,80
10:24:24	95,80
10:24:26	95,80
10:24:27	95,80
10:24:29	95,80
10:24:31	95,80
10:24:32	95,80
10:24:34	95,80
10:24:35	95,80
10:24:37	95,80
10:24:38	95,80
10:24:40	95,80
10:24:41	95,80
10:24:43	95,80
10:24:44	95,80

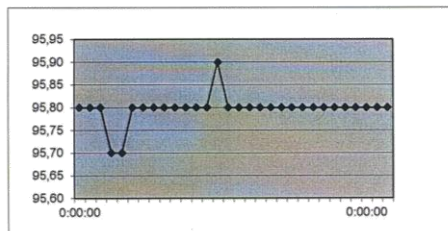
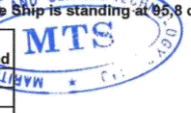


Table of empirical data of the DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM (When using Kalmand filter, the Ship is standing at 133,5 degrees)

Timer	Angle measured
9:35:14	133,0
9:35:16	133,80
9:35:17	134,10
9:35:19	134,20
9:35:20	134,20
9:35:22	134,10
9:35:23	134,10
9:35:25	134,10
9:35:26	134,10
9:35:28	134,20
9:35:30	134,20
9:35:31	134,20
9:35:33	134,20
9:35:34	134,00
9:35:36	134,00
9:35:37	133,90
9:35:39	133,90
9:35:40	133,80
9:35:42	133,80
9:35:43	133,80
9:35:45	133,80
9:35:47	133,30
9:35:48	133,30
9:35:50	133,30
9:35:51	133,30
9:35:53	133,40
9:35:54	133,40
9:35:56	134,10
9:35:57	133,30
9:35:59	133,40

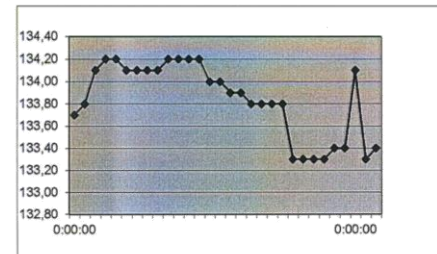


Table of empirical data of the **DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM**, When using Kalmand filter, the Ship is is moving around 2 degrees

11:45:35	2,00
11:45:37	2,00
11:45:38	2,00
11:45:40	2,00
11:45:41	2,00
11:45:43	2,00
11:45:44	2,00
11:45:00	2,00
11:45:47	2,10
11:45:49	2,10
11:45:50	2,10
11:45:52	2,10
11:45:53	2,10
11:45:09	2,10
11:45:11	2,10
11:45:12	2,10
11:45:14	2,10
11:45:15	2,10
11:45:17	2,20
11:45:18	2,20
11:45:20	2,20
11:45:21	2,20
11:45:23	2,20
11:45:24	2,20
11:45:26	2,20
11:45:27	2,20
11:45:29	2,20
11:45:31	2,20
11:45:32	2,20
11:45:34	2,20
11:40:09	2,20

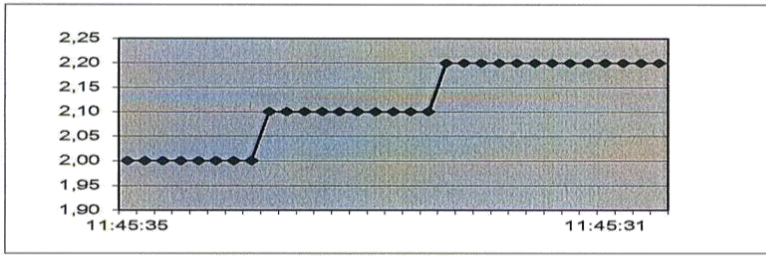


Table of empirical data of the **DIGITAL MAGNETIC COMPASS SYSTEM**, When using Kalmand filter, the Ship is is moving around 2 degrees

11:45:35	2,00
11:45:37	2,00
11:45:38	2,00
11:45:40	2,00
11:45:41	2,00
11:45:43	2,00
11:45:44	2,00
11:45:00	2,00
11:45:47	2,10
11:45:49	2,10
11:45:50	2,10
11:45:52	2,10
11:45:53	2,10
11:45:09	2,10
11:45:11	2,10
11:45:12	2,10
11:45:14	2,10
11:45:15	2,10
11:45:17	2,20
11:45:18	2,20
11:45:20	2,20
11:45:21	2,20
11:45:23	2,20
11:45:24	2,20
11:45:26	2,20
11:45:27	2,20
11:45:29	2,20
11:45:31	2,20
11:45:32	2,20
11:45:34	2,20
11:40:09	2,20

