

На правах рукописи

Королев Владимир Викторович

**СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ И КОНТРОЛЯ
НАПРЯЖЕНИЙ В КОРПУСЕ СУДНА
С МАГНИТОУПРУГИМИ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы
Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (технические системы)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2010

Работа выполнена в Федеральном образовательном учреждении высшего профессионального образования Государственной морской академии имени адмирала С.О. Макарова на кафедре «Электрооборудования и автоматики судов».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Николай Егорович Жадобин

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Константин Викторович Недялков,
кандидат технических наук, доцент Владимир Иванович Ратников

Ведущая организация: Федеральное государственное учреждение «Российский морской регистр судоходства» (г. Санкт-Петербург).

Защита состоится 18 марта 2010 г в 14³⁰ на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 223.002.03 при Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственная морская академия имени адмирала С.О. Макарова» по адресу: 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, дом 14, аудитория 21. Факс (812) 321 36 81.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственной морской академии имени адмирала С.О. Макарова

Автореферат разослан 16 февраля 2010г.

Ученый секретарь

Совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций Д 223.002.03,

доктор технических наук,
профессор

В.А. Петухов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Серьезные аварии последних десятилетий, связанные с переломом судов (в том числе с серьезными загрязнениями окружающей среды), указывают на то обстоятельство, что вопросам оценки износа корпусов и восстановления технического состояния судов и оборудования, (в частности, малоциклового усталости) уделяется недостаточно внимания. Ведущая роль в определении нагрузок и вибрации отводится автоматическим средствам контроля, которые обеспечили бы массовые измерения возникающих нагрузок в конструкциях, а также деформации корпуса в целом и любых, в том числе и недоступных для наблюдателя, местах. Особое место в контроле прочности судовых конструкций занимают датчики напряженного состояния корпуса и вибрации, а также системы сбора и обработки информации от этих датчиков. На основе анализа существующих систем контроля можно сказать, что наиболее приемлемыми в качестве датчиков контроля напряжений в корпусе, являются магнитоупругие преобразователи (МУП), которые, однако, в настоящее время широко еще не используются.

Цель и задачи исследования

В настоящей работе основной целью исследования является разработка автоматической системы контроля напряженного состояния корпусных конструкций и вибраций с использованием МУП. Для достижения этой цели потребовалось решить следующие задачи.

1. Проанализировать проходящие в корпусных конструкциях судов процессы во время эксплуатации и оценить возникающие в них напряжения и вибрации на волнении, и связанные с ними повреждения, при этом особо обратить внимание на такие явления как слеминг и выпинг.
2. Дать вероятностную оценку внешних сил на нерегулярном волнении и определить пути контроля прочности, и прогнозирования долговечности корпуса судна и его корпусных конструкций.
3. Исследовать методы и системы, применяемые при натурных измерениях напряжений в корпусе судна.
4. Проанализировать современное состояние аппаратуры для определения характеристик случайных процессов.
5. Рассмотреть и проанализировать статические и динамические характеристики МУП.

6. Разработать функциональную схему автоматической многоканальной системы контроля напряженного состояния корпуса судна, блоки аналоговой и цифровой обработки сигнала, провести анализ отдельных звеньев.

7. Обосновать количество и места установки магнитоупругих датчиков системы контроля вибрации и напряженного состояния корпуса судна.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы системного анализа и синтеза, математического анализа, теории вероятностей и математической статистики, теории случайных процессов, аналоговой и цифровой обработки сигналов.

Научная новизна заключается в следующем:

1. На основе анализа процессов в судовых корпусных конструкциях обосновано использование низкочастотных фильтров с конечно-импульсной характеристикой в системах контроля напряженного состояния и вибрации.

2. Разработана научная методика определения оптимального количества и информативных мест установки магнитоупругих датчиков на судовых конструкциях и комплексах. В разработанной автоматической системе контроля, для обработки измеряемых сигналов, использован низкочастотный КИХ-фильтр (фильтр с конечно-импульсной характеристикой). Это обусловлено характером протекаемых в корпусе судна и корпусных конструкциях процессов.

3. Предложен алгоритм измерения параметров случайных процессов с последующей обработкой и хранением информации.

4. Предложен способ оптимизации процесса измерения и контроля на основании метода математической регрессии.

Практическое значение работы. Практическое значение результатов исследования состоит в следующем:

1. Создан автоматический многоканальный цифровой прибор с использованием МУП, позволяющий вести непрерывный мониторинг напряженного состояния и вибрации корпуса судна. А также сигнализировать о превышениях критических значений во время погрузки судна в порту и при плавании в условиях волнения и слеминга.

2. Разработана методика оптимального использования прибора в автоматических системах измерения и контроля напряжений и вибраций в судовых корпусных конструкциях.

3. Жадобин, Н.Е., Королев, В.В. Регрессионный анализ в исследовании слеминга // Эксплуатация морского транспорта. – 2006. – № 45. – С. 245 – 251.

4. Жадобин, Н.Е., Королев В.В., Заставный, С.В. Фильтрация низкочастотных случайных процессов, протекающих в корпусе судна // Эксплуатация морского транспорта. – 2009. – № 1(55). – С. 65 – 67.

5. Королев, В.В., Жадобин, Н.Е. Исследование полей деформаций судовых корпусов // Эксплуатация морского транспорта. – 2008. – № 3(53). – С. 73 – 75.

6. Королев, В.В. Анализ погрешностей тензометрических датчиков при измерениях механических напряжений в корпусе корабля // Межвуз. Сб. науч. тр. Вып. 14. / материалы конф. проф.-преп. сост. государств. образ. учреждений высш. проф. образования г. Санкт-Петербурга (23 – 24 апреля 2007 г.). – СПб., 2007. – С. 175 – 179.

7. Королев, В.В., Жадобин, Н.Е., Аппаратура для определения характеристик случайных процессов при исследовании слеминга // Эксплуатация морского транспорта. – 2006. – № 45. – С. 230 – 238.

8. Королев, В.В., Жадобин, Н.Е. Ударные изгибающие моменты. Повреждения судов от слеминга // Эксплуатация морского транспорта. 2006. – № 45. – С. 238 – 245.

9. Королев, В.В., Жадобин Н.Е., Заставный, С.В. КИХ-фильтры в системах контроля напряженного состояния корпуса судна // Эксплуатация морского транспорта. – 2007. – № 4(50). – С. 65 – 67.

10. Королев, В.В., Жадобин, Н.Е., Заставный, С.В., Использование методов гибкой логики в многоканальных системах контроля напряженного состояния корпуса судна // Эксплуатация морского транспорта. – 2008. – № 4(51). – С. 58 – 61.

11. Королев, В.В., Заставный С.В. Цифровая обработка сигнала в системе контроля напряженного состояния корпуса судна // Межвузовский сб. науч. тр. – Вып. 14: материалы конф. проф.-преп. сост. государств. образовательных учреждений высш. проф. образования. – СПб., – 2007. – С. 179 – 185.

12. Королев, В.В., Жадобин, Н.Е., Заставный С.В. Контроль технического состояния корпуса судна // Эксплуатация морского транспорта. – 2008. – № 4(54). – С. 65 – 71.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ
ИЗДАНИЯХ:

В ИЗДАНИЯХ ПО ПЕРЕЧНЮ ВАК РФ

1. Жадобин, Н.Е., Королев, В.В., Заставный С.В. Контроль механических напряжений и деформаций в корпусе судна // Контроль диагностика. – 2010. – № 2. – С. 38 – 43.
2. Королев, В.В. Элементы сигнализации в автоматической системе контроля и измерения механических напряжений и деформаций в корпусе судна // Эксплуатация морского транспорта. – 2009. – №4(58), с. 61 – 64.
3. Королев, В.В. Система измерений механических напряжений в корпусе судна. “Дефектоскопия” журнал № 1, 2008. с. 57 – 68.
4. Королев, В.В. Применение магнитоупругих преобразователей в системах измерения механических напряжений в корпусе судна. “Датчики и системы” журнал № 4, 2008. с. 33 – 39.
5. Королев, В.В., Жадобин, Н.Е. Аморфные и нанокристаллические материалы в магнитных датчиках механических напряжений // Эксплуатация морского транспорта. – 2010. – № 1(59). с. 69 – 71.
6. Королев, В.В., Жадобин, Н.Е., Заставный С.В., Многоканальная система контроля напряженного состояния корпуса судна. “Мехатроника, автоматизация, управление” журнал, № 8, 2008. с. 54.
7. Королев, В.В., Жадобин, Н.Е., Заставный С.В., Многоканальная система контроля напряженного состояния корпуса судна. “Мехатроника, автоматизация, управление”, приложение, журнал, № 8, 2008. с. 18 – 21.
8. Korolev, V.V., A system for Measuring Mechanical Stresses in a Vessel Hull. Russian journal of Nondestructive Testing № 1, 2008. Vol.44, pp.45 – 53.

В ДРУГИХ ИЗДАНИЯХ

1. Жадобин, Н.Е., Королев, В.В., Заставный, С.В. Использование методов гибкой логики в многоканальных системах контроля напряженного состояния корпуса судна // Эксплуатация морского транспорта. – 2008. – № 2(52). – С. 69 – 70.
2. Жадобин, Н.Е., Королев, В.В. Система контроля напряжений и деформаций в корпусе судна // Тр. XXXVIII Уральского семинара (23 – 25 декабря 2008 г., г. Миасс). – Т. 1, Екатеринбург. – 2008. – С. 149 – 157.

Достоверность результатов. Достоверность полученных результатов и сделанных выводов обеспечивается достаточной сходимостью теоретических зависимостей и результатов испытаний прибора с магнитоупругими преобразователями.

Реализация результатов работы. Полученные результаты диссертационной работы использованы в ООО “СудТехСервис” на судне “Baltic Strait”, а также в учебном процессе на кафедре «Электродвижение и автоматика судов» в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственная морская академия им. адм. С.О. Макарова» при изучении дисциплин: «Элементы и функциональные устройства судовой автоматики» и «Системы управления судовыми энергетическими процессами».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих мероприятиях:

1. Научных заседаниях кафедры электродвижения и автоматики судов ГМА им. адм. С.О. Макарова. Санкт-Петербург, 2005 – 2009 г.
2. Международной конференции в ГМА им. адм. С.О. Макарова по вопросу: “Тенденции морского образования в XXI веке: Морские администрации, судоходные компании и учебные заведения в условиях глобализации – общие интересы и сотрудничество. Санкт-Петербург, 2007г.
3. XXXVIII Уральском семинаре по механике и процессам управления. Миасс Челябинской области, 2008 г.
4. Международной конференции “Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения”, в Институте проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН. Москва, 2008 г.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 19 печатных работ, из них 7 статей в журналах по перечню ВАК, 1 статья в материалах международной конференции.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников и приложения в одном томе. Содержит 184 страницы, включая 160 страниц текста, 64 рисунка и 10 таблиц. Библиография включает 66 наименований отечественной и зарубежной литературы.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены основные положения, выносимые автором на защиту, и дана ее общая характеристика.

В первой главе освещается вопрос, связанный с анализом особенностей автоматизации процессов оценки и прогнозирования технического состояния судового оборудования, электротехнических комплексов и судовых корпусных конструкций. Приводится описание источников напряжений основных составных частей корпуса судна и действующих на них нагрузок; условий прочности судового корпуса и корпусных конструкций. Проводится анализ существующих систем контроля прочности в процессе эксплуатации. Результаты анализа дают основания считать, что основными причинами повреждения корпусных конструкций являются следующие факторы (и их совокупное действие):

- существенные ошибки в оценке внешних нагрузок и вибраций при проектировании;
- несовершенство расчетных схем, не дающих возможность установить достоверную взаимосвязь параметров напряженного состояния в различных сечениях корпуса;
- ошибки в конструкционном оформлении узлов, технологические дефекты, недостаточно высокое качество материала и др.

Надежную информацию о величине действующих напряжений в корпусе и корпусных конструкциях можно получить только посредством непрерывного мониторинга напряженного состояния корпуса и вибрации в течение эксплуатации, особенно в тяжелых и штормовых условиях плавания.

Во второй главе рассматриваются возможные варианты нагрузок на корпусные конструкции судов и дается их классификация. Особое внимание уделено таким явлениям как днищевой слеминг, бортовой слеминг, заливаемость палубы и связанная с этим вибрация корпуса (выпинг). Во второй части главы приводятся закономерности трехмерного нестационарного волнения, а также проанализированы выходные характеристики случайного процесса нагружения корпуса судна на волнении. В определенных условиях волнения и хода судна могут возникать удары носовой оконечности о воду – слеминг, как при выходе носовой оконечности из воды (днищевой слеминг), так и без выхода из воды вследствие большого развала

1. Проанализированы проходящие в корпусных конструкциях судов процессы во время эксплуатации, и описаны напряжения в корпусе судна на волнении и связанные с ними повреждения.
2. Обоснована необходимость контроля таких явлений как слеминг и выпинг.
3. Проведено исследование существующих методов и измерительных систем контроля механических напряжений в корпусе судна.
4. Сделан вывод, что в условиях реального плавания наиболее приемлемыми являются магнитоупругие преобразователи. С помощью МУП можно не только производить сбор информации о состоянии корпусных конструкций, но и производить вероятностный анализ параметров напряженности. Показано, что МУП, ввиду своей малой инерционности, с успехом могут быть применены для обнаружения как днищевого, так и бортового слеминга.
5. Разработана функциональная схема многоканальной системы контроля напряженного состояния корпуса судна, блоков аналоговой и цифровой обработки сигнала. В разработанном приборе разумно сочетаются аналоговый и цифровой методы обработки сигнала, учтена так же финансовая сторона проекта.
6. Для получения низкочастотной составляющей спектра обосновано применение и разработан низкочастотный КИХ-фильтр.
7. Решена задача оптимального количества датчиков системы контроля напряженного состояния корпуса и места их установки на судне.
8. Разработаны компьютерная программа для вычисления вероятностных характеристик процесса нагружения корпуса судна.
9. Научно обоснована возможность применения метода математической регрессии в процессе сбора информации от датчиков, установленных на судне.
10. Разработанные в работе методика контроля, прибор и математический аппарат значительно повысят уровень безопасности мореплавания, также они позволят судоводителям, во время работы, опираться не на положения “хорошей морской практики”, а на реально собранные данные во время рейса и на обоснованные научные рекомендации.

К системе можно подключать до 16 каналов для входных сигналов изменяющихся в диапазоне 0 – 5В. Для сопряжения блока цифровой обработки с компьютером выбран последовательный интерфейс стандарта RS232C. Максимальная скорость передачи данных интерфейса RS232 составляет 20 кбод, а как уже указывалось выше, необходимая скорость и объем передаваемой информации невелики, рекомендуемая длина передающей линии составляет примерно 17м. На рис. 11 представлена схема управления дистанционными датчиками через последовательный интерфейс. На рисунке: *BB* схема ввода вывода рассмотренная выше. В предлагаемой системе предусмотрено совмещение интерфейса RS232C с более распространенным сейчас USB.

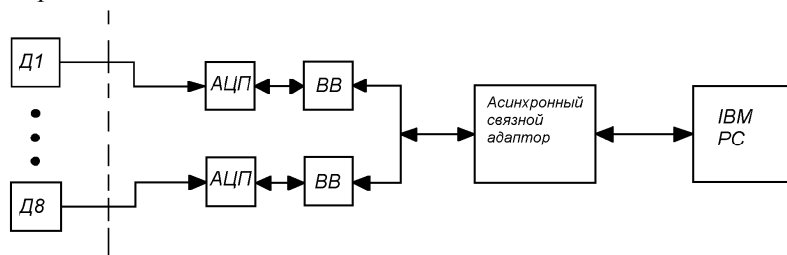


Рис. 11. Схема управления дистанционными датчиками через последовательный интерфейс RS232C

Программное обеспечение (представлено в приложении) позволяет при записи информации формировать отдельные файлы со значениями напряжений разделенных по частоте от каждого датчика, всего 32 файла. Предлагаемая программа расчета параметров случайного процесса выполнена на языке высокого уровня Pascal. Метод регрессии основан на том, что четко прослеживается связь между ударными нагрузками в районе носа и миделя в одинаковые моменты времени. Можно провести анализ случайных процессов и выявить, а затем построить регрессионную зависимость между различными значениями напряжений в различных участках корпуса и его связях для модели, выполненной при условии соблюдения динамического и геометрического подобия.

бортов (бортовой слеминг), а также динамические нагрузки от заливания палубы. Кроме того, возникает общая затухающая вибрация корпуса, приводящая в ряде случаев к значительным общим напряжениям, изменяющимся с частотой первого тона упругих колебаний корпуса. На рис. 1. представлена выкопировка из осциллограмм процессов, характеризующих вертикальный изгибающий момент на судне «Профессор Попов».

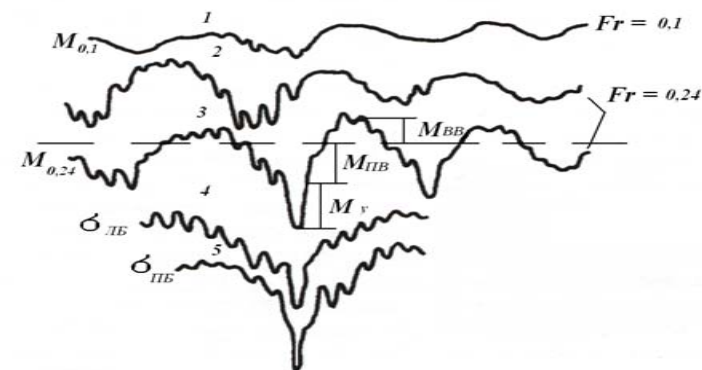


Рис. 1. Выкопировки из осциллограмм, полученных при испытании модели и натурального судна «Профессор Попов»:

1, 3 – вертикальный изгибающий момент для модели;
2 – ускорения на миделе модели; 4, 5 – напряжения в палубном стрингере плоскохода «Профессор Попов»

Длина зоны удара равна $0.2L$; положение центра удара по длине корпуса $0.15L$ от носового перпендикуляра. Волновая вибрация носит резонансный характер и вызывается действием многократно приложенных периодических сил.

Третья глава представляет собой анализ аппаратуры для определения характеристик случайных процессов. Приведены функциональные схемы приборов для определения вероятностных характеристик, намечены пути совершенствования данных приборов и применение их для анализа напряженного состояния корпуса. Небольшая часть главы посвящена анализу существующих низкочастотных фильтров и амплитудным детекторам, как основным звеньям при построении аналоговой части приборов по измерению напряженного состояния в корпусе. Волновые нагрузки, действующие

на корпус судна на нерегулярном волнении, являются случайными процессами, вызванными морским волнением. На рис. 2 показан спектр частот процессов, протекающих на скоростных судах.

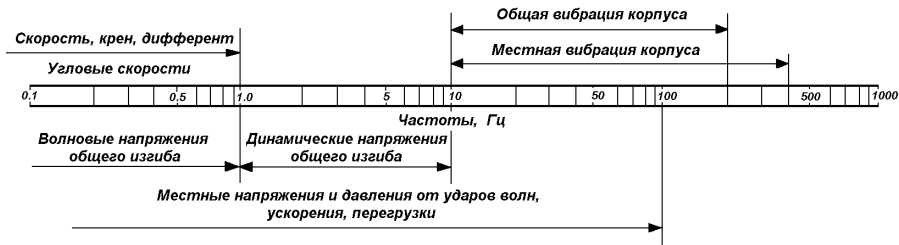


Рис. 2. Спектр частот процессов протекающих на скоростных судах

С падением скорости значения измеряемых величин падают, но в районе носа судна в целом остаются высокими. На рис. 3 показана запись напряжений, включающая волновые (низкочастотные) и вибрационные напряжения. Измерения проводились для судна дедвейтом $D_w = 10000$ т. Максимальное значение вибрационных напряжений достигало 50 % размаха суммарных волновых напряжений.

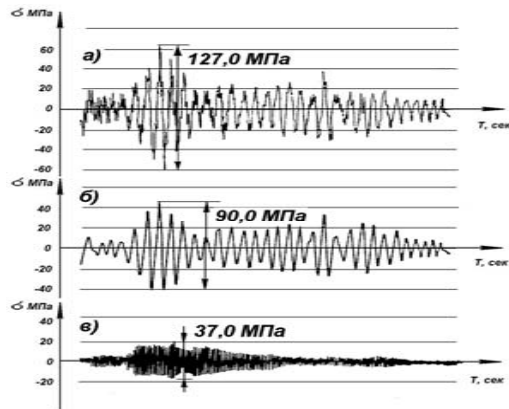


Рис. 3. Запись напряжений, волновых (низкочастотные) и вибрационных напряжений

В четвертой главе рассматриваются методы и аппаратура для натурных измерений напряжений в корпусе судна, приводятся их характери-

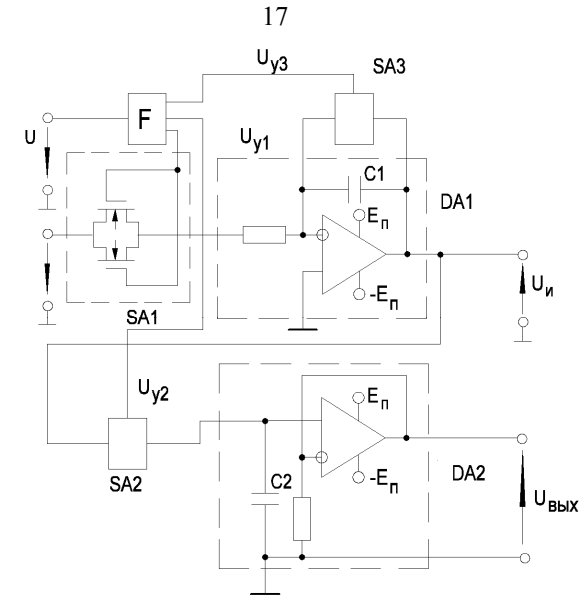


Рис. 9. КИХ-фильтр нижних частот

Автоматическая многоканальная система контроля, отвечающая поставленным задачам, может быть построена на основе ИС ADC 0816 (фирмы National Semiconductor) – 8 – разрядного АЦП, имеющего на кристалле аналоговый мультиплексор, допускающий включение УВХ (устройство выборки-хранения) между его выходом и входом АЦП.

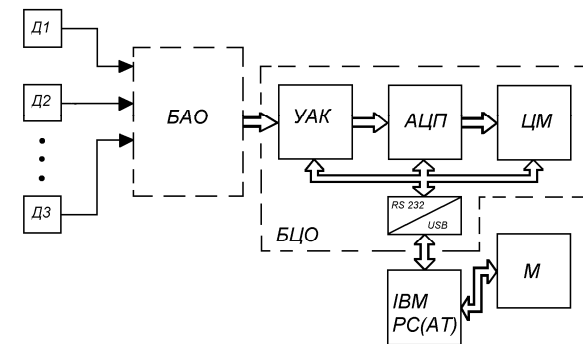


Рис. 10. Функциональная схема блока цифровой обработки

протекающих процессов в корпусе, составляет 0,05 – 100 Гц. Для компенсации нулевого сигнала служат фазовращатель ΦB . Взаимная компенсация нулевого сигнала МУП и выходного напряжения ΦB происходит с помощью суммирующего усилителя CVI . С усилителя сигнал поступает на демодулятор DM , который выделяет огибающую кривую, которая отражает процессы, протекающие в корпусе судна. Для выделения постоянной составляющей сигнала напряжение поступает на фильтр нижних частот $\Phi HЧ4$ ($f_c = 0.05$ Гц, где f_c – частота среза). Для фильтрации низкочастотных составляющих, применяют усредняющие фильтры, основанные на реализации специальной весовой функции конечной длительности, КИХ-фильтры. Выделение сигнала реализуется активным интегратором на операционном усилителе $DA1$ (рисунок 9), управляемом бесконтактными (на полевых транзисторах) переключателями $SA1 - SA3$, с активным элементом, состоящим из конденсатора $C2$, запоминающего напряжение на выходе интегратора, и повторителя напряжения на операционном усилителе $DA2$. Перспективным видится путь создания автоматических систем контроля, в которых сигналы обрабатываются элементами, основанными на гибкой логике, т.е. полностью программируемыми элементами. Такие элементы: цифровые фильтры, компараторы, демодуляторы и т. д. легко перестраиваемы. С использованием цифровых программируемых фильтров с успехом могут решаться вопросы по моделированию процессов нагружения судовых корпусных конструкций.

Методы гибкой логики и ее элементы могут помочь в моделировании и вибраций и процессов механических нагружений конструкций электро-технического судового оборудования и систем.

Функциональная схема $БЦО$ представлена на рисунке 10. Основным элементом является 16 канальный АЦП, блоком управления для которого служит тактовый генератор с частотой тактирующих импульсов 200Гц. На рисунке: $УАК$ – управляемый аналоговый коммутатор, $ЦМ$ – цифровой мультиплексор, $М$ – монитор, $АЦП$ – аналого-цифровой преобразователь, USB – интерфейсный порт.

ки и анализируются их недостатки. Несколько разделов посвящено рассмотрению аморфных магнитных материалов, которые используются при проектировании датчиков механических напряжений. Приведены основы расчета магнитоупругих преобразователей. Чувствительным элементом трансформаторных магнитоупругих преобразователей при измерении механических напряжений является участок корпуса судна. Сложная зависимость магнитоупругой чувствительности материалов корпуса судна затрудняет получение универсальной зависимости изменения магнитной проницаемости от механических напряжений, что вызывает необходимость индивидуальной тарировки датчика. При разработке магнитоупругих датчиков с заранее известными характеристиками следует использовать эталонный чувствительный элемент. При использовании чувствительного элемента из пластины трансформаторной стали необходимо учитывать проникновение магнитного потока по всей толщине. На рис. 4 показаны цилиндрические магнитопроводы радиусом ρ обмоток возбуждения двух МУП, установленных с двух сторон пластины.

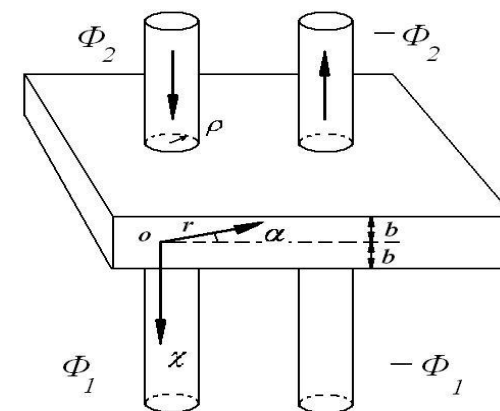


Рис. 4. Цилиндрические магнитопроводы двух МУП

Электромагнитное поле определяется при втекании переменных магнитных потоков Φ_1 , и Φ_2 через два цилиндрических магнитопровода. В общем случае потоки Φ_1 и Φ_2 имеют различные значения и направления. Учет влияния пары магнитопроводов можно определить, используя метод наложения. Электромагнитные процессы в пластине описываются уравнением Гельмгольца:

$$\nabla^2 \vec{H} + k \vec{H} = 0$$

где: ∇^2 – оператор Лапласа;

\vec{H} – вектор напряженности магнитного поля;

$$k = \sqrt{-j\omega\gamma\mu},$$

где:

γ – удельная электрическая проводимость;

μ – магнитная проницаемость;

ω – угловая частота источника питания.

В цилиндрической системе координат вектор напряженности магнитного поля имеет две составляющие H_z и H_r , которые не зависят от координаты α .

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + k^2 H_z = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 H_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial r} - \frac{1}{r^2} H_r + \frac{\partial^2 H_r}{\partial z^2} + k^2 H_r = 0. \quad (2)$$

Проделав преобразования и применяя формулу обращения, получим выражение для вертикальной составляющей напряженности:

$$\text{при } r < \rho: H_z = \frac{\Phi_1}{\pi r^2 \mu}, \quad (z = b), \quad H_z = \frac{\Phi_2}{\pi r^2 \mu}, \quad (z = -b);$$

$$\text{при } r \Rightarrow \rho: H_z = 0.$$

Для решения уравнения (2) можно применить интегральное преобразование Ханкеля и получить обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка для изображения радиальной составляющей вектора напряженности магнитного поля:

имеем для H_r :

$$\text{при } z = -b: H_r = \frac{jk}{2\pi\mu r} \left[\frac{\Phi_2}{sh(2jkb)} - \frac{\Phi_1}{th(2jkb)} \right], \quad (3)$$

$$\text{при } z = b: H_r = \frac{jk}{2\pi\mu r} \left[\frac{\Phi_2}{th(2jkb)} - \frac{\Phi_1}{sh(2jkb)} \right]. \quad (4)$$

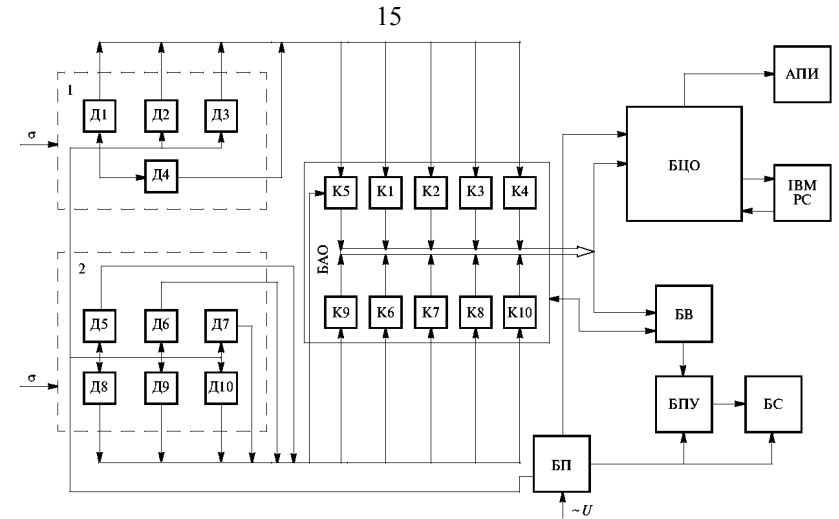


Рис.7 Функциональная схема системы контроля напряженного состояния корпуса судна:

1 – группа датчиков в носу, 2 – группа датчиков миделя.

Для питания узлов системы переменным и постоянным током предусмотрен блок питания *БП*, получающим в свою очередь питание от судовой сети 220В, 50Гц. Блок аналоговой обработки сигнала (*БАО*) (рисунок 8) получает сигнал от МУП.

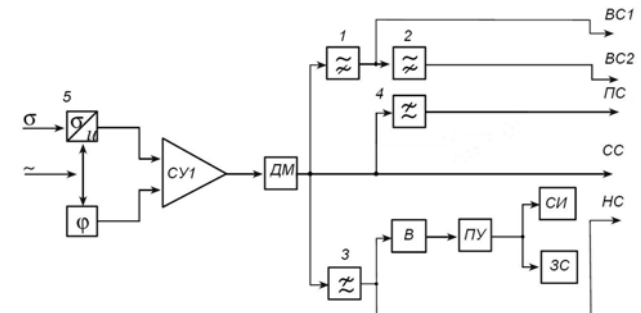


Рис.8. Функциональная схема блока аналоговой обработки сигнала и элементов сигнализации

Полезный сигнал изменяется пропорционально механическим напряжениям в корпусе и содержит весь спектр частот изменяющегося механического напряжения. Для современных судов диапазон частот спектра,

датчиков выбрано 10. На рис. 6 представлена схема расположения датчиков, с учетом смещений максимумов изгибающих моментов на волнении. На рисунке: d – высота борта, L – длина судна. Датчики разделены на две группы: 4 расположены в носу и контролируют слеминговые явления, причем 2 из них установлены на обшивке обоих бортов на высоте $0.2d$ от ватерлинии, 4 расположены в районе миделя и один в кормовой части на уровне ватерлинии.

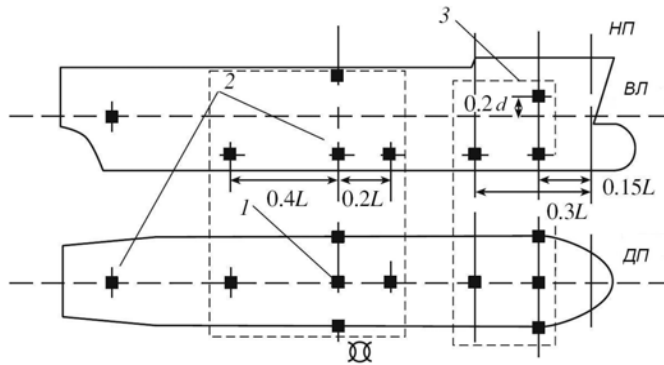


Рис. 6. Размещение датчиков на судне.

1 – датчик напряжений МУП, 2 – группа датчиков миделя и кормы,
3 – группа датчиков в носу.

Функциональная схема системы контроля напряженного состояния корпуса судна показана на рис. 7. На рисунке представлены датчики носовой группы Д1 – Д5; Д6 – Д8 – группа миделя, Д9 – Д10 – кормовые датчики. Аналоговая обработка сигнала происходит в блоке БАО, состоящим из 8 подблоков обработки К1 – К8, обслуживающих каждый датчик в отдельности. В блоках выделяется ряд сигналов различной частоты: ВС – высокочастотная составляющая, НС – низкочастотная, ПС – постоянная составляющая и СС – суммарный демодулированный сигнал. Для осуществления сигнализации предусмотрены блок выпрямления сигнала БВ, а так же блок пороговых устройств БП, для сравнения преобразованных сигналов с предельно-допустимыми значениями напряжений. В блоке сигнализации БС предусмотрены световая и звуковая сигнализации. Для представления полученных данных, обработки, а так же записи процессов предусмотрен блок цифровой обработки сигнала БЦО совмещенный с персональным компьютером IBM-PC и монитором АПИ.

Так, при $2b = 0,5$ мм и $\sqrt{\gamma\omega\mu} = 1000\text{м}^{-1}$:

$$|th(2jkb)| = 0,492, |sh(2jkb)| = 0,495,$$

а при $\sqrt{\gamma\omega\mu} = 10000\text{ м}^{-1}$ и той же толщине пластины:

$$|th(2jkb)| \approx 1, |sh(2jkb)| = 548.$$

Приведенные значения соответствуют реальным диапазонам изменения γ , ω и μ . В общем случае из выражений (3), (4) видно, что значения радиальной составляющей H_r на поверхности пластины зависят от потоков двух магнитопроводов. Если $|th(2jkb)| \rightarrow 1$, а $|sh(2jkb)| \rightarrow \infty$, то взаимное влияние потоков двух магнитопроводов на значения H_r не наблюдается. В магнитоупругих датчиках механических напряжений магнитопровод устанавливается над чувствительным элементом, поэтому в полученном выражении можно принять, что $\Phi_1=0$, $\Phi_2=\Phi$ тогда:

$$H_r = \frac{jk\Phi}{2\pi\mu r \cdot sh(2jkb)}, z = -b,$$

$$H_r = \frac{jk\Phi}{2\pi\mu r \cdot th(2jkb)}, z = b.$$

Если, $|th(2jkb)| \rightarrow 1$, а $|sh(2jkb)| \rightarrow \infty$, то получим следующее выражение для реальной составляющей вектора напряженности магнитного поля:

$$H_r = \frac{jk\Phi}{2\pi\mu r}.$$

Для устранения влияния электромагнитных свойств материала корпуса на характеристики магнитоупругого датчика электромагнитное поле не должно проникать в тело корпуса. Для этого $|th(2jkb)| = 1$. При выбранной пластине из трансформаторной стали устранение влияния свойств материала конструкции корпуса судна на характеристики датчика можно получить увеличением частоты источника питания. Приведенный анализ показывает, что использование эталонного чувствительного элемента не привело к

изменению характера распределения электромагнитного поля, создаваемого обмоткой возбуждения магнитоупругого датчика.

Перспективность применения аморфных магнитных сплавов (АМС) в электротехнических комплексах и системах, и магнитных датчиках (МД) обусловлена тем, что в этих материалах легко получить требуемые сочетания магнитных, механических, электрических и химических свойств. Такие как: высокую магнитную проницаемость при малой коэрцитивной силе и низких потерях на гистерезис, высокое удельное сопротивление ($130 - 190 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$) и соответственно низкие потери на вихревые токи, высокий предел прочности ($2500 - 4000 \text{ МПа}$), высокую износостойкость, обусловленную большой твердостью (1000 по Викерсу), желаемую форму петли гистерезиса. В последнее время для построения магнитных датчиков так же предложены толстые ферритовые пленки (ТФП) – еще один класс магнитных материалов. Создание магнитоупругих аморфных тонких лент и проволок малого диаметра позволило значительно повысить чувствительность датчиков механических напряжений и деформаций. На рисунке 5, приведена принципиальная схема датчика механических напряжений, действующих на стальное изделие, основанного на зависимости магнитной проницаемости изделия от действующих напряжений, включая продольные (вдоль оси x), поперечные, изгибающие и остаточные. В датчике использована аморфная лента состава $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ толщиной 30 мкм. Датчик состоит из двух взаимно перпендикулярно расположенных над поверхностью изделия (1) U-образных сердечников (2 и 3), изготовленных из 45 % пермаллоя в виде стержней диаметром 2 мм. Расстояние между полюсами каждого сердечника составляет 10мм, а между каждым полюсом и изделием – 0,5 мм. На обмотку первого сердечника (800 витков) подается переменный ток возбуждения частотой 400 Гц, а выходное напряжение снимается с обмотки (1200 витков) второго сердечника. Сердечники 2 и 3 вместе со стальным изделием образуют магнитный мост, благодаря чему выходное напряжение датчика U_v пропорционально разности магнитной проницаемости изделия в двух взаимно перпендикулярных направлениях, являющейся функцией величины и направления приложенного к изделию напряжения.

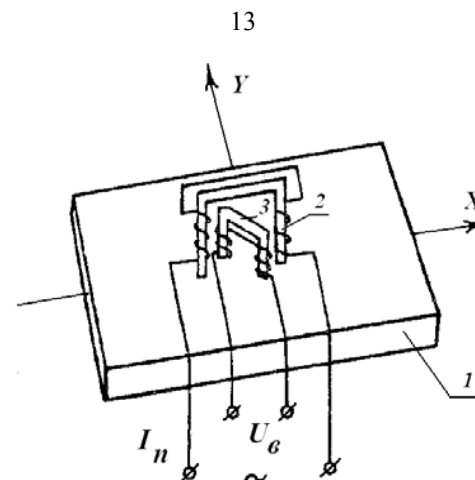


Рис. 5. Принципиальная схема датчика механических напряжений

Для указанной конструкции при токе возбуждения $I_n = 10 \text{ мА}$ получена линейная зависимость выходного напряжения U_v от продольного напряжения сжатия и растяжения в пределах от 0 до $\pm 200 \text{ МПа}$. Соответствующие изменения U_v составляли $\pm 1 \text{ В}$. Масса такого бесконтактного датчика составляет 17г.

В пятой главе разработана схема расположения магнитоупругих датчиков на судне и их количество. В основной части главы представлена разработка многоканальной системы контроля и сигнализации напряженного состояния корпуса, с магнитоупругими преобразователями. Системы контроля напряжений в корпусе, состоит из двух основных частей: аналоговой и цифровой. Приведены расчеты параметров производительности цифрового блока схемы. Далее разработана компьютерная программа для расчета вероятностных характеристик. В заключение дана методика оптимизации измерений процесса нагружения на основе метода регрессионного анализа и модельных испытаний, а также произведен расчет связанных с этим ошибок (представлено в приложениях). В судовых условиях реального плавания может быть использована стационарная многоканальная система контроля с МУП, которая осуществляет автоматизацию сбора и измерений информации и сигналов с датчиков, установленных на судах. В качестве примера размещения датчиков на судне, выбран балкер, количество