

ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ КОРПУСА СУДНА

У статті проведено оцінку метрологічних характеристик елементів пристрою контролю механічних напружень корпусу судна, для чого було виконано експериментальне дослідження складових елементів цього пристрою. Для компенсації магнітного поля Землі запропоновано використовувати додатковий магнітометричний канал. Отримані результати досліджень дають можливість розробити та виготовити дослідно-промисловий зразок ферозондового пристрою безперервного контролю механічних напружень корпусу судна

Ключові слова: корпус судна, пружні напруження, залишкова намагніченість, ферозонд, магнітометричний канал

В статье проведена оценка метрологических характеристик элементов устройства контроля механических напряжений корпуса судна, для чего было выполнено экспериментальное исследование составляющих элементов этого устройства. Для компенсации магнитного поля Земли предложено использовать дополнительный магнитометрический канал. Полученные результаты исследований дают возможность разработать и изготовить опытно-промышленный образец феррозондового устройства непрерывного контроля механических напряжений корпуса судна

Ключевые слова: корпус судна, упругие напряжения, остаточная намагниченность, феррозонд, магнитометрический канал

В. В. Мирошников
Доктор технических наук, профессор*
E-mail: v.miroshnikov@mail.ru

А. И. Шевченко
Кандидат технических наук, доцент*
E-mail: shew.a@yandex.ru

О. П. Завальнюк
Старший преподаватель
Кафедра эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики
Херсонская государственная морская академия
пр. Ушакова, 20, г. Херсон, Украина, 73000
E-mail: olga-zavalnjuk@mail.ru
*Кафедра приборов
Восточнoукраинский национальный университет им. Владимира Даля
кв. Молодежный, 20-а, г. Луганск, Украина, 91034

1. Введение

В соответствии с данными Регистра судоходства Украины [1] большинство судов морского флота, которые ходят под флагом Украины, построенные еще в прошлом веке, исчерпали свой ресурс. Такие суда (возрастом свыше 25 лет) имеют большой износ и уменьшающийся с каждым годом запас прочности. Судно – это сложное инженерное сооружение, которое для выполнения своего предназначения должно обладать рядом качеств, в том числе и прочностью, т. е. способностью [2, 3] выдерживать без разрушений с заданной степенью гарантии внешние силовые воздействия в течение заданного срока службы при оговоренных условиях эксплуатации. Условия эксплуатации судового корпуса [4, 5] характеризуются наличием разного рода нагрузок, механических напряжений, возникающих в несущих судовых конструкциях и вызванных грузовыми и балластными операциями, а также влиянием взволнованного моря.

Установлено [6 – 9], что повреждения отдельных корпусных конструкций судов вызваны недостаточной общей продольной и местной прочностью. Это обусловлено, главным образом, тем, что во время экс-

плуатации судна не учитываются величина и распределение упругих напряжений, действующих в несущих судовых конструкциях. Постоянное превышение допускаемых напряжений способно привести к разрушению корпуса. Поэтому непрерывный контроль механических напряжений в корпусе судна в масштабе реального времени является необходимым условием безопасности мореплавания.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Сейчас применяемые на судах и построенные на различных физических принципах средства контроля упругих напряжений корпусов [10 – 13] имеют ряд недостатков. Среди них основными являются: неудобство эксплуатации, а также необходимость предварительного физического воздействия с помощью преобразователя на судовую конструкцию и дальнейшего исследования ее реакции на это воздействие.

Одним из методов, не требующим предварительного воздействия на металл корпуса судна каким-либо видом физического поля, является магнитометриче-

ский метод, позволяющий использовать магнитное поле Земли, в котором находится судно. Установлено [14], что величина остаточной намагниченности зависит от величины механических напряжений в металле. Для измерения величины остаточной намагниченности на поверхности судна наиболее перспективными являются магнитомодуляционные преобразователи – феррозонды [15]. Предлагаемый метод обеспечивает контроль механических напряжений в реальном масштабе времени, однозначно связывает эти напряжения с контролируемым параметром – остаточной намагниченностью. Вместе с тем, устройство, реализующее данный метод, построенное на базе феррозондов, должно быть простым и надежным в эксплуатации.

3. Цель и задачи исследования

Оценить метрологические характеристики элементов устройства контроля механических напряжений корпуса судна, для чего провести экспериментальное исследование составляющих элементов этого устройства.

4. Экспериментальные исследования характеристик феррозонда

Экспериментальная установка разработана на базе катушек Гельмгольца. Выполнение условий идентичности катушек по размерам и числу витков, а также равенства расстояния между катушками их радиусу a , позволяет получить вблизи центральной точки однородное аксиальное поле с точностью до $(x/a)^4$. При радиусе катушек Гельмгольца $a = 180$ мм, они позволяют получить магнитное поле в центральной точке до 10000 А/м. Для уменьшения влияния магнитного поля Земли на результаты измерения, катушки Гельмгольца ориентировались таким образом, чтобы направление поля Земли было перпендикулярно аксиальному полю катушек.

Катушки Гельмгольца подключаются к источнику питания Б5-47, позволяющему регулировать ток с шагом 0,01 А и точностью 1,5 %.

Феррозонд размещается в центре катушек Гельмгольца на предметном столике, который имеет возможность перемещаться по высоте. В качестве сердечников феррозонда использован пермаллой 79НМ ($B_S = 0,75$ Тл, $H_S = 2500$ А/м), для стабилизации характеристик которого произведен его отжиг. Размеры сердечника: длина – 0,1 м; ширина – $2 \cdot 10^{-3}$ м; толщина – $25 \cdot 10^{-6}$ м. Обмотка возбуждения, имеющая 667 витков, равномерно намотана на двух сердечниках. Дополнительные обмотки возбуждения содержат по 227 витков и расположены по краям сердечников, намотанные поверх основной обмотки возбуждения. Выходная обмотка феррозонда содержит 667 витков и является общей для двух сердечников. Феррозонд возбуждается синусоидальным напряжением частотой 100 кГц и амплитудой 20 В.

Блок-схема феррозондового магнитометрического канала приведена на рис. 1.

С выходной обмотки сигнал феррозонда поступает на усилитель переменного напряжения, далее на

синхронный детектор, в качестве которого используется быстродействующий электронный ключ, который управляется удвоенной частотой возбуждения. Полученная таким образом вторая гармоника выходного сигнала усиливается усилителем У3, а затем сигнал детектируется амплитудным детектором (АД) и сглаживается фильтром низкой частоты (ФНЧ2). К выходу ФНЧ2 подключена обмотка обратной связи (ООС). ООС представляет собой соленоид длиной равной длине сердечника феррозонда, внутрь которого помещается сам феррозонд. К ФНЧ2 через масштабирующий усилитель У4 подключен цифровой вольтметр, позволяющий регистрировать выходное напряжение магнитометрического канала.

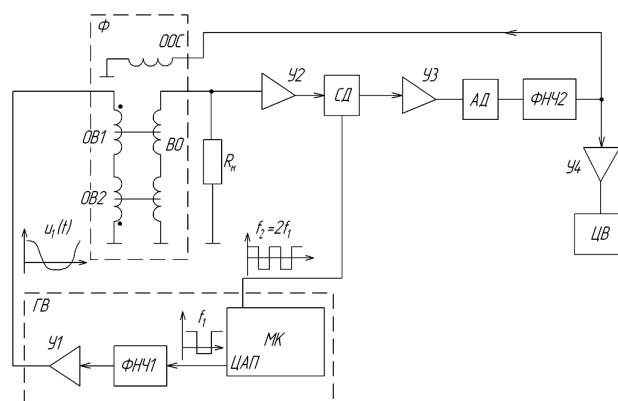


Рис. 1. Блок-схема магнитометрического канала: ГВ – генератор возбуждения; МК – микроконтроллер; ФНЧ1, ФНЧ2 – фильтр низкой частоты; У1–У4 – усилители; СД – синхронный детектор; АД – амплитудный детектор; ЦВ – цифровой вольтметр; Ф – феррозонд; ОБ1, ОБ2 – обмотки возбуждения; ВО – выходная обмотка; ООС – обмотка обратной связи

Предложенное в схеме двойное детектирование выходного сигнала феррозонда позволяет добиться высокой стабильности сигнала по сравнению со схемой, использующей усилитель постоянного тока. Учитывая непрерывный режим работы магнитометрического канала в широком диапазоне температур, применение в качестве У3 усилителя переменного напряжения значительно уменьшает дрейф магнитометрического канала.

Коэффициент передачи магнитометрического канала обработки выходного сигнала феррозонда определяется как

$$K = \frac{K_{\Phi} \cdot K_{У2} \cdot K_{СД} \cdot K_{У3} \cdot K_{АД}}{1 + K_{\Phi} \cdot K_{У2} \cdot K_{СД} \cdot K_{У3} \cdot K_{АД} \cdot K_{ООС}} \quad (1)$$

Значения коэффициентов, входящих в формулу (1), определяются ниже.

K_{Φ} – коэффициент передачи феррозонда по амплитудному значению сигнала, который рассчитывается в соответствии с [15] и равен: $K_{\Phi} = 0,42 \cdot 10^{-4}$ Вм / А. $K_{У2}$ – коэффициент передачи усилителя У2, в качестве которого используется прецизионный операционный усилитель AD822 с коэффициентом усиления $K_{У2} = 10$. Коэффициент передачи синхронного детектора [16] составляет $K_{СД} = 0,85$. $K_{У3}$ – коэффициент переда-

чи усилителя мощности TDA 1020, который равен: $K_{y3} = 3$. $K_{Ад}$ – коэффициент передачи амплитудного детектора, выполненного в виде мостового выпрямителя [17], составляет $K_{Ад} = 0.96$. $K_{Ос}$ – коэффициент цепи обратной связи, который определяется параметрами обмотки обратной связи, ее длиной $l_{Ос} = 100$ мм

и числом витков $\omega_{Ос} = 270$. $K_{Ос} = \frac{\omega_{Ос}}{l_{Ос}} = 2700 \text{ 1/м}$.

Полученное таким образом значение коэффициента передачи магнитометрического канала составляет $K = 0,0027 \text{ Вм/А}$. Учитывая диапазон измеряемых магнитных полей корпуса судна, который составляет 50-3000 А/м, выходное напряжение магнитометрического канала изменяется в диапазоне 0,135÷8,1 В. Измерения, проводимые цифровым вольтметром в данном диапазоне, имеют погрешность $\delta_v = 1,1 \%$.

Определение результирующей погрешности магнитоизмерительного канала проводится на основании погрешностей входящих в него узлов. Погрешность, вызванная нестабильностью коэффициента преобразования магнитометрического канала, охваченного отрицательной обратной связью, определяется выражением:

$$\delta_k = \frac{\Delta K}{K} = \frac{1}{1 + K_{пр} \cdot K_{ос}} \cdot \frac{\Delta K_{пр}}{K_{пр}} - \frac{K_{пр} \cdot K_{ос}}{1 + K_{пр} \cdot K_{ос}} \cdot \frac{\Delta K_{ос}}{K_{ос}}, \quad (2)$$

где $K_{пр} = K_{\phi} \cdot K_{v2} \cdot K_{сд} \cdot K_{y3} \cdot K_{Ад}$ – коэффициент преобразования прямой цепи; $K_{ос}$ – коэффициент преобразования цепи обратной связи.

Анализ элементов прямой цепи магнитометрического канала показывает, что благодаря выбранному режиму линейного усиления, нелинейность коэффициента передачи прямой цепи уменьшается в $1 + K_{пр} \cdot K_{ос}$ раз. Учитывая, что $K_{пр} \ll K_{ос}$, рассматривается только влияние $K_{ос}$ на погрешность коэффициента преобразования магнитометрического канала

$$K = \frac{1}{K_{ос}} = \frac{R}{C_k}, \quad (3)$$

где R – сопротивление, определяющее коэффициент передачи усилителя мощности, $C_k = \omega_{ос} / l$ – постоянная катушки обратной связи.

Относительная погрешность коэффициента преобразования (2) магнитометрического канала с учетом формулы (3) запишется следующим образом

$$\delta_k = \frac{\Delta K}{K} = \frac{\Delta R}{R} - \frac{\Delta C_k}{C_k}, \quad (4)$$

где $\frac{\Delta R}{R}$ – относительная погрешность изменения коэффициента передачи усилителя мощности; $\frac{\Delta C_k}{C_k}$ – относительная погрешность изменения постоянной катушки обратной связи.

В схеме магнитометрического канала использовались постоянные резисторы типа С2-29В с допуском $\pm 0,5 \%$. Таким образом, $\frac{\Delta R}{R} = 1 \%$.

Под воздействием температуры окружающей среды обмотка обратной связи изменяет свою длину $l_{ос}$, при

этом ее число витков остается постоянным. Следовательно, относительная погрешность изменения постоянной катушки обратной связи будет определяться только изменением ее длины.

$$\frac{\Delta C_k}{C_k} = \frac{\Delta l_{ос}}{l_{ос}}. \quad (5)$$

Учитывая рядную намотку катушки обратной связи на стеклотекстолитовый каркас, $\frac{\Delta l_{ос}}{l_{ос}} = 1,7 \cdot 10^{-5}$

1/°С. При изменении температуры на 40 °С $\frac{\Delta l_{ос}}{l_{ос}} = 0,1 \%$.

Погрешность измерения остаточной намагниченности зависит также от смещения и дрейфа нуля, как самого феррозонда, так и устройства обработки его выходного сигнала. Данная погрешность в основном сосредоточена во входном операционном усилителе, имеющем максимальный коэффициент усиления в данной схеме. Учитывая, что в качестве входного операционного усилителя используется AD822, который имеет автоматическую корректировку нуля, его погрешность будет вызываться только температурным дрейфом. Приведенная к входу феррозонда погрешность будет равна

$$\delta_y = \frac{TKU_{см}}{K_{\phi} \cdot K_{Ад} \cdot H_{иmax}} \cdot \Delta \theta^{\circ}, \quad (6)$$

где $TKU_{см} = 8 \text{ мкВ/К}$ – температурный коэффициент напряжения смещения для операционного усилителя AD822, $H_{иmax} = 3000 \text{ А/м}$ – максимальное значение напряженности измеряемого магнитного поля.

Погрешность входного операционного усилителя при заданных значениях составляет $\delta_y = 0,018 \%$. Дрейф нуля феррозонда определялся экспериментально, так как он зависит от большого числа факторов. В ходе длительных наблюдений при изменении температуры от -18 °С до 40 °С $\delta_{\phi} = 0,58 \%$. Таким образом, результирующее значение погрешности магнитометрического канала

$$\delta_m = \sqrt{\delta_k^2 + \delta_y^2 + \delta_{\phi}^2} = 1,07 \%. \quad (7)$$

Полученная погрешность магнитометрического канала была проверена экспериментально на установке, представленной на рис. 2.

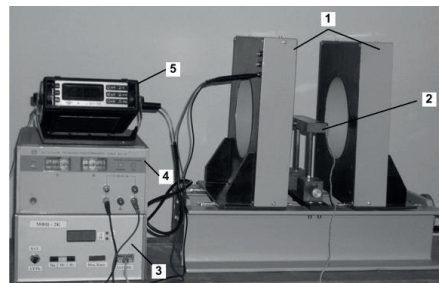


Рис. 2. Экспериментальная установка для исследования характеристик феррозонда: 1 – катушки Гельмгольца; 2 – исследуемый феррозонд; 3 – МФЦ-2К – магнитометр феррозондовый цифровой 2-х компонентный; 4 – источник питания Б5-47; 5 – цифровой вольтметр В7-35

Величина тока катушек Гельмгольца изменялась в пределах 0,1...2,0 А. Ориентируя установку в магнитном поле Земли, как было описано ранее, достигается то, что влияние внешнего магнитного поля будет находиться в пределах 1 А/м. Выходное напряжение магнитометрического канала регистрируется цифровым вольтметром В7-35. Многократно проведенные результаты измерений позволили установить, что основная погрешность магнитометрического канала не превышает 2,3 %.

Погрешность экспериментальной установки оценивается как

$$\delta_{\text{эу}} = \sqrt{\delta_{\text{кр}}^2 + \delta_{\text{ин}}^2}, \tag{8}$$

где $\delta_{\text{кр}}$ – относительная погрешность поля, создаваемая катушкой Гельмгольца, $\delta_{\text{кр}} = 0,8 \%$; $\delta_{\text{ин}}$ – относительная погрешность источника питания Б5-47, работающего в режиме стабилизации тока $\delta_{\text{ин}} = \pm(1\%I_{\text{уст}} + 0,2\%I_{\text{max}}) = 1,2\%$. Таким образом, погрешность экспериментальной установки составляет $\delta_{\text{эу}} = 1,44 \%$.

Погрешность измерения магнитного поля экспериментальной установки в нормальных условиях оцени-

вается величиной: $\delta_{\text{мп}} = \sqrt{\delta_{\text{эу}}^2 + \delta_{\text{м}}^2} = 1,79 \%$.

Поскольку феррозонд имеет определенную длину, он измеряет поле не в точке, а усредненное по длине сердечника значение напряженности поля, следовательно, необходимо учитывать значение этой погрешности. Усредненное значение напряженности поля в сердечнике феррозонда

$$H_{\text{ср}} = \frac{1}{l} \int_{-l/2}^{l/2} H(x) dx. \tag{9}$$

Величина $H(x)$ рассчитывается теоретически для каждого значения длины сердечника. В результате расчетов установлено, что при измерении вертикальной составляющей напряженности поля, погрешность не превышает $\delta_{\text{фт}} = 2,1 \%$. При измерении горизонтальной составляющей поля, погрешность составляет $\delta_{\text{фп}} = 2,5 \%$.

Общая относительная погрешность магнитометрического канала измерения остаточной намагниченности с учетом погрешности регистрирующей аппаратуры ($\delta_{\text{р}} = 1 \%$) составила:

$$\delta_{\text{мм}} = \sqrt{\delta_{\text{мп}}^2 + \delta_{\text{м}}^2 + \delta_{\text{фп}}^2 + \delta_{\text{р}}^2} = \sqrt{1,79^2 + 1,07^2 + 2,5^2 + 1^2} = 3,4\%.$$

При измерении остаточной намагниченности корпуса судна, произвольно ориентированного в магнитном поле Земли, величина данного поля накладывается на измеряемое поле и является составляющей погрешности измерения. Поэтому, необходимо компенсировать данное поле. Для его компенсации используется дополнительный магнитометрический канал. При этом его феррозонд относится на такое расстояние от корпуса судна, чтобы его поле не измерялось этим феррозондом. Функциональная схема устройства с каналом компенсации представлена на рис. 3.

Устройство измерения остаточной намагниченности содержит измерительный канал (ИК) с феррозондом $\Phi 1$, измеряющим поле рассеяния корпуса судна и поле Земли, а также компенсационный канал (КК) с феррозондом $\Phi 2$, измеряющим только поле Земли. Сигнал отрицательной обратной связи КК подается одновременно в обмотки обратной связи феррозондов $\Phi 1$ и $\Phi 2$.

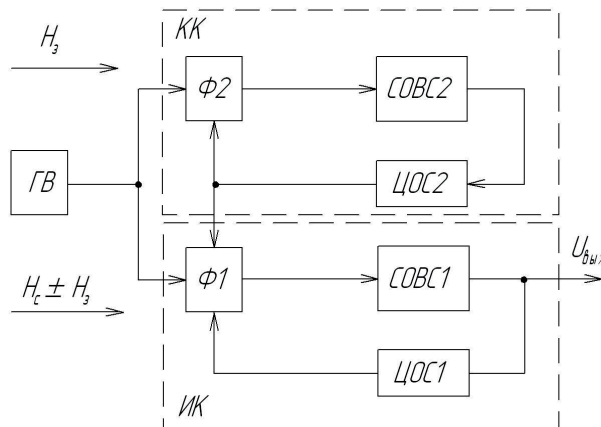


Рис. 3. Функциональная схема устройства с каналом компенсации магнитного поля Земли: ГВ – генератор возбуждения; ИК – измерительный канал; КК – компенсационный канал; $\Phi 1, \Phi 2$ – феррозонд; СОВС1, СОВС2 – схема обработки выходного сигнала; ЦОС1, ЦОС2 – цепь обратной связи

Выходной сигнал $U_{\text{вых}}$ измерительного канала определяется следующей зависимостью

$$U_{\text{вых}} = \frac{(H_c \pm H_3)K_1}{1 + K_1K_{\text{oc1}}} - \frac{H_3K_1K_{\text{oc}}K_2}{(1 + K_1K_{\text{oc1}})(1 + K_2K_{\text{oc2}})}, \tag{10}$$

где H_c – напряженность магнитного поля рассеяния судна; H_3 – напряженность магнитного поля Земли; K_1 – коэффициент передачи СОВС1; K_2 – коэффициент передачи СОВС2.

При выполнении условий $K_1K_{\text{oc1}} \gg 1$ и $K_2K_{\text{oc2}} \gg 1$ выходное напряжение измерительного канала будет

$$\text{равно } U_{\text{вых}} = H_c \cdot \frac{1}{K_{\text{oc1}}}.$$

6. Выводы

Полученные результаты экспериментальных исследований магнитометрического канала показывают, что его погрешность от внешних факторов, прежде всего от влияния изменения температуры в диапазоне: $-18 \text{ }^\circ\text{C} \dots +40 \text{ }^\circ\text{C}$, не превышает 1,07 %. Регистрация величины остаточной намагниченности, осуществляемая с использованием феррозондового магнитометрического канала, производится с относительной погрешностью 3,4 %, которая учитывает погрешность регистрирующих приборов.

Принимая во внимание диапазон измерения напряженности корпуса судна, находящийся в пределах 1200...5700 А/м, данная погрешность магнитометрического канала позволяет контролировать механические

напряжения в корпусе судна, с учетом того, что корреляционная зависимость напряженности магнитного поля от механических напряжений составляет порядка 7,8-12 %.

Полученные результаты проведенного эксперимента дают возможность разработать и изготовить

опытно-промышленный образец феррозондового устройства непрерывного контроля механических напряжений корпуса судна при проведении грузовых и балластных операций.

Литература

1. Официальный сайт Регистра судоходства Украины. Регістрова книга суден. – Режим доступа к сайту: <http://www.shipregister.ua>
2. Регістрова книга суден [Электронный ресурс] / Регистр судоходства Украины.— Режим доступа : \www/ URL: <http://shipregister.ua/> – 13.01.2014 г. – Загл. с экрана.
3. Томашевский, В. Т. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение; СПб.: Политехника. Расчет и конструирование машин. Раздел IV. Корабли и суда. Т. IV-20. Общая методология и теория кораблестроения. Кн. 1 [Текст] / В. Т. Томашевский, В. М. Пашин, И. Г. Захаров и др; Под ред. В. Т. Томашевского, В. М. Пашина. – СПб.: Политехника, 2003. – 744 с.
4. Rawson, K. J. Basic Ship Theory. [Text] / K. J. Rawson, E. C. Tupper // Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann. – 2001. – Vol. 1. – 379 p.
5. House, D. Cargo Work For Maritime Operations [Text] / D. House. – Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. – 323 с.
6. Завальнюк, О. П. Мониторинг прочности судна как один из путей обеспечения безопасности мореплавания [Текст] / О. П. Завальнюк, В. Б. Нестеренко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2011. – № 4. – С. 53–56.
7. Повреждения и пути совершенствования судовых конструкций [Текст] / Н. В. Барабанов, Н. А. Иванов, В. В. Новиков, Г. П. Шемендук. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1989. – 256 с.
8. Casualty Reports 2008, 2009, 2010, 2011, 2012 [Электронный ресурс] / Международная ассоциация владельцев сухогрузных судов (INTERCARGO).— Режим доступа : \www/ URL: <http://intercargo.org/> – 13.01.2014 г. – Загл. с экрана.
9. Ship Structure Committee Case Study [Text] / Межведомственный комитет исследования и развития безопасности судовых конструкций (Ship Structure Committee).— Режим доступа : \www/ URL: <http://shipstructure.org/> – 13.01.2014 г. – Загл. с экрана.
10. Casualty Reports [Text] / Японское классификационное общество Nippon Kaiji Kyokai (Class NK).— Режим доступа : \www/ URL: <http://classnk.or.jp/> – 13.01.2014 г. – Загл. с экрана.
11. Hull Stress Monitoring System «HULLMOS» [Text] / Компания конструкционного анализа, измерений и мониторинга для морских применений ROUVARI OY (Финляндия).— Режим доступа : \www/ URL: <http://rouvari.fi/> – 13.01.2014 г. – Загл. с экрана.
12. The fiber optic hull stress monitoring system «SENSFIB» [Text] / Компания по разработке волоконно-оптических автоматизированных систем контроля мореходности Light Structures AS (Норвегия).— Режим доступа : \www/ URL: <http://lightstructures.no/> – 13.01.2014 г. – Загл. с экрана.
13. Detection of Safety Critical Cracks and corrosion in ships using novel sensors and systems based on Ultrasonic Phased Array Technology [Text] / «Ship-Inspector».— Режим доступа : \www/ URL: <http://shipinspector.eu/> – 13.01.2014 г. – Загл. с экрана.
14. Завальнюк, О. П. Применение коэрцитиметрии для анализа технического состояния корпусов судов различных сроков эксплуатации [Текст] / О. П. Завальнюк, В. Б. Нестеренко // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 4. – С. 22–27.
15. Мирошников, В. В. Исследование возможности контроля упругих напряжений по величине остаточной намагниченности металла [Текст] / В. В. Мирошников, О. П. Завальнюк // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – 2013. – № 34 (1007). – С. 12–17.
16. Афанасьев, Ю. В. Феррозондовые приборы [Текст] / Ю. В. Афанасьев. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 188 с.
17. Яковенко, В. В. Синхронный детектор для обработки выходных сигналов феррозондов с однополярным импульсным возбуждением [Текст] / В. В. Яковенко, А. В. Лойко, Л. В. Донская, В. Я. Гальченко // Приборы и техника эксперимента. – 1989. – №6. – С. 104–106.
18. Шевченко, А. И. Феррозондовая дефектоскопия осей колесных пар [Текст] / А. И. Шевченко, Д. Г. Ткачик, Тхфер Басам // Праці Луганського відділення Міжнародної академії інформатизації. – 2003. – №2(7). – С. 60–62.