

УДК 620.179.143.5

В.Б. Нестеренко¹, В.В. Мирошников (д-р техн. наук, проф.)¹Херсонская государственная морская академия
кафедра управления судном и безопасностью жизнедеятельности на море
E-mail: nesterenko_mast@mail.ru; v.miroshnikov@mail.ru**АНАЛИЗ РАБОТЫ МАГНИТОУПРУГОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
НА ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСА СУДНА**

Суда типа река-море имеют длину более 100 метров, что приводит к намагничиванию корпуса до величины (1020 ... 3633) А/м. При установке на поверхности корпуса судна магнитоупругого преобразователя для контроля величины механических напряжений на контролируемый участок корпуса действует одновременно постоянное магнитное поле корпуса судна и переменное поле возбуждения преобразователя. За счет постоянного тока поля рабочая точка на кривой намагничивания смещается, что приводит к уменьшению магнитной проницаемости контролируемого металла и как следствие, снижению уровня чувствительности магнитоупругого преобразователя. Так для Ст3 и сталь 20 снижение чувствительности может достичь (15 – 23) %, что существенно нивелирует достоинства магнитоупругих преобразователей и делает контроль с их помощью малодостоверным на крупногабаритных объектах.

Ключевые слова: преобразователь, магнитная проницаемость, погрешности, деформация, петля гистерезиса.

Общая постановка проблемы. Серьезные аварии последних десятилетий, связанные с переломом судов (в том числе с серьезными загрязнениями окружающей среды), указывают на то обстоятельство, что вопросам износа корпусов, трещинообразования (в частности, малоциклового усталости) уделяется недостаточно внимания. Из 24,7 тыс. обследованных в Японии судов на 5,34 тыс. были обнаружены существенные дефекты корпусов [1]. Имеются многочисленные случаи повреждения конструкций корпуса танкеров, балкеров, контейнеровозов. Анализ гибели балкеров с 1990 г. по 1997 г., проведенный Лондонским институтом страховщиков и Регистром Ллойда показал, что за этот период из 106 погибших судов 30 балкеров потеряно из-за повреждения корпуса [2]. Значительное место занимают повреждения, вызванные ошибками членов экипажа при управлении судами в штормовых условиях.

Ведущая роль в определении нагрузок отводится простым и надежным приборам контроля, которые обеспечили бы массовые исследования деформации корпуса судна в любых, в том числе и недоступных для наблюдателя, местах. Предельные нагрузки могут быть найдены только в условиях натуральных испытаний корпуса судна. В 1992 г. Подкомитет по проектированию и оборудованию судов согласился с рекомендациями Регистра Ллойда о целесообразности установки на балкерах водоизмещением более 20000т приборов подобного типа. Однако в настоящее время меньше 0,5 % судов мирового флота оснащено приборами, контролирующими напряжения в корпусе [1]. Особое место в контроле прочности судовых конструкций занимают датчики напряженного состояния корпуса, а также системы сбора и обработки информации от этих датчиков. Существующие системы контроля напряжений в корпусе, построенные с использованием тензометрических и пьезометрических преобразователей, не в полной мере отвечают современным требованиям к точности измерений и надежности.

Учитывая условия эксплуатации и необходимость обеспечения высокой чувствительности системы контроля к возникающим механическим напряжениям целесообразно

строить такие системы на базе магнитоупругих преобразователей. Данные преобразователи достаточно хорошо себя зарекомендовали при измерении механических нагрузок как контактным, так и бесконтактным способом. Не смотря на высокую чувствительность магнитоупругих преобразователей, она во многом зависит от условий контроля и характеристик объекта контроля, а именно от ферромагнитных свойств корпуса судна. Проведем анализ магнитных характеристик металла корпуса судна влияющих на величину магнитоупругого эффекта.

Ферромагнитный материал представляет собой конгломерат кристаллов, ориентированных кристаллическими осями случайно. Магнитные свойства кристаллов ферромагнитного материала в разных направлениях различны [3], т.е. кристаллы магнитно анизотропны и имеют предпочтительные кристаллографические направления, по которым намагничиваются с наименьшей затратой магнитной энергии. При деформации ферромагнитного материала под действием внешнего усилия изменяется ориентация кристаллов и величина необходимой энергии намагничивания. При изменении направления ориентации кристаллов поликристаллического образца изменяются его линейные размеры, т.е. наблюдается явление магнитострикции. При положительной магнитострикции размеры кристалла растут в направлении внешнего магнитного поля. Под действием растягивающего усилия намагниченность кристалла вдоль направления растяжения в этом случае облегчается. При отрицательной магнитострикции, наоборот, намагниченность ухудшается. Под влиянием упругой деформации изменяется форма кристаллической решётки ферромагнитного материала и ориентация вектора самопроизвольной намагниченности J_s областей в решётке. Устойчивые направления J_s обусловлены [4] энергией магнитной анизотропии кристалла, магнитоупругой и внешнего магнитного поля. Любое искажение кристаллической решётки ферромагнитного тела будет влиять на его намагниченность.

Между изменением размеров ферромагнитного тела в направлении действия внешнего магнитного поля H изменением индукции B под действием внешних механических напряжений σ существует зависимость [3, 5]:

$$\frac{J}{l} \frac{dl}{dH} = \frac{1}{4\pi} \frac{dB}{d\sigma}.$$

Магнитный поток Φ от внешнего источника поля равен:

$$\Phi = BS = 4\pi J_s S,$$

где S – поперечное сечение образца.

При деформации растяжения ферромагнитного материала во внешнем магнитном поле $H > H_s$ магнитный поток будет изменяться за счёт изменения J_s и сечения S , т.е.:

$$d\Phi = 4\pi S dJ_s + 4\pi J_s dS.$$

Выражая dS/S через модуль упругости E , механическое напряжение σ и коэффициент поперечного изменения размеров ε , получим:

$$\frac{dS}{S} = 2\varepsilon \frac{\sigma}{E} - \varepsilon^2 \frac{\sigma^2}{E^2}.$$

Пренебрегая значением ε^2 в силу его малого значение, получим:

$$d\Phi = 4\pi S \left(dJ_s + 2J_s \varepsilon \frac{\sigma}{E} \right).$$

Отсюда следует, изменение магнитного потока при деформации ферромагнитного образца зависит от изменения его намагниченности J_s , механических свойств и размеров.

В результате механических напряжений при заданной напряжённости магнитного поля H изменяется величина магнитной индукции B .

Так как $B = \mu H$, где μ – магнитная проницаемость, то под влиянием механических напряжений при неизменном внешнем магнитном поле изменяется магнитная проницаемость ферромагнетика. Относительное изменение μ от механических напряжений определяется выражением [6]:

$$\frac{d\mu}{\mu} = \frac{1}{\pi} \mu_n \lambda_0 \sigma.$$

где μ_n – начальная магнитная проницаемость; λ_0 – начальная магнитострикция.

Данное выражение показывает, что изменение магнитной проницаемости зависит от механических напряжений $\mu = f(\sigma)$, а чувствительность к упругим напряжениям тем больше, чем больше начальная магнитная проницаемость нагружаемого ферромагнитного материала.

Судно, как объект контроля имеет достаточно сложную форму и смело может быть отнесено к крупногабаритным объектам. Так балкер «Сибирский» имеет длину 128,43 м; ширину 15,63 м; высоту борта 5,45 м, при этом его можно рассматривать как объект призматической формы в магнитном поле Земли. При таких габаритных размерах судна имеет коэффициент формы $m = 72,66$, поэтому намагниченность корпуса судна может достигать $H = 3633$ А/м. в зависимости от положения судна в силовых линиях магнитного поля Земли намагниченность корпуса судна может изменяться в пределах (1020 – 3633) А/м, что приводит к изменению магнитной проницаемости ферромагнитного материала корпуса судна [11]. Изменение магнитной проницаемости металла корпуса судна приводит к изменению величины магнитоупругого эффекта возникающего в корпусе судна под действием, испытывающим им механических нагрузок.

Постановка задач исследования. Целью работы является повышение точности и как следствие достоверности результатов контроля величины механических напряжений крупногабаритных объектов (в частности судов типа река-море) меняющих свое положение в магнитном поле Земли.

Для решения поставленной задачи проводится анализ работы магнитоупругого эффекта и определяется основной параметр, магнитная проницаемость материала, от величины которой зависит чувствительность данного метода. Анализируя поведение ферромагнитного материала в процессе работы магнитоупругого преобразователя, когда контролируемая область металла одновременно находится в постоянном и переменном магнитном поле. Рассматривается процесс перемагничивания металла корпуса судна и определяется положение рабочей точки на кривой намагничивания металла, определяющей значение магнитной проницаемости и, следовательно, коэффициента преобразования магнитоупругого датчика.

Результаты разработки и исследований. Контролируемая область корпуса судна находится под воздействием электромагнитного поля, возбуждаемого одновременно токами нулевой и конечной частоты. Для такого поля в общем случае переменная и постоянная составляющие индукции (напряженности магнитного поля) в любой момент времени могут не совпадать по направлению и перемагничивание ферромагнетика будет происходить под действием двух полей разных частот, ориентированных под произвольным углом. Если обе составляющие индукции или совпадают по направлению (в один полупериод колебаний),

или направлены навстречу друг другу (в другой полупериод), то перемагничивание ферромагнетика принято называть одновременным перемагничиванием в постоянном и переменном продольных электромагнитных полях. Когда поля разных частот имеют взаимно ортогональное направление, перемагничивание ферромагнетика называют одновременным намагничиванием взаимно ортогональными постоянным и переменным электромагнитными полями.

Как следует из основных термодинамических соотношений при наличии переменных и постоянных составляющих электромагнитного поля в выражение для характеристики внутренней энергии ферромагнитной области кроме величины истинной обратимой работы перемагничивания входят диссипативные составляющие, наличие которых обусловлено явлением гистерезиса и макроскопическими вихревыми токами. Диссипативные составляющие, в свою очередь, влияют на распределение теплового поля внутри ферромагнетика. Таким образом, при строгом рассмотрении функций состояния ферромагнитной среды, находящейся под воздействием комбинированного электромагнитного поля, необходим учет всего комплекса перечисленных факторов.

При проектировании электротехнических устройств, проявление диссипативных эффектов, по возможности, стараются свести к минимуму путем подбора ферромагнитного материала, выбора оптимальной толщины пластин и частоты переменной составляющей поля. При контроле корпуса судна мы не имеем такой возможности, поэтому в первом приближении можно принять, что магнитные характеристики одновременного перемагничивания ферромагнетика в продольном электромагнитном поле двух частот выражают обратимую работу перемагничивания. Тогда состояние ферромагнитной среды при условии постоянства температуры в каждой её точке в каждый момент времени определяет результирующая величина индукции или напряженности магнитного поля, связанных нелинейной зависимостью $B=f(H)$. Для расчета достаточно знать явный вид этой зависимости и значение B или H в каждый момент времени. Подобный подход широко используется при анализе процессов, например, в магнитных усилителях, когда связь $B=f(H)$ представляют в виде некоторой математической функции, а индукцию или напряженность магнитного поля – в виде суммы постоянной и переменной составляющих [7]. Будем рассматривать магнитоупругий преобразователь как систему двух намагничивающих устройств имеющих магнитопровод и намагничивающие обмотки, питающиеся от постоянного и переменного тока.

Для расчета и анализа электромагнитных устройств, ферромагнитные области которых находятся под воздействием постоянного и переменного полей, более удобны характеристики, представляющие взаимосвязь между отдельными составляющими переменных магнитного поля B и H . Воспользуемся семейством кривых одновременного намагничивания в виде зависимости переменной составляющей индукции B_{\sim} от переменной составляющей напряженности магнитного поля H_{\sim} при различных фиксированных значениях постоянной составляющей напряженности магнитного поля $H_{=}$, т. е. зависимости $B_{\sim}=f(H_{\sim}, H_{=})$. Такого рода зависимости, по сути дела, являются вольт-амперными характеристиками, определяющими величину падения переменного напряжения на катушке с ферромагнитным сердечником $u_{\sim k}$ как элементе электрической цепи в функции от величины полного переменного тока той же катушки $i_{\sim w_{\sim}}$ и полного постоянного тока подмагничивающих катушек $i_{=w_{=}}$, т. е. $u_{\sim k}=f(i_{\sim w_{\sim}}, i_{=w_{=}})$. Переход от характеристик $u_{\sim k}=f(i_{\sim w_{\sim}}, i_{=w_{=}})$ к зависимостям $B_{\sim}=f(H_{\sim}, H_{=})$ осуществляется следующим образом. Как известно, величина падения переменного напряжения на одном витке связана с величиной нормальной составляющей индукции B_n по поперечному сечению магнитопровода s , которое данный виток охватывает, следующим соотношением:

$$u_{\sim} = -\frac{d}{dt} \int_s B_n ds. \quad (1)$$

В таком случае величина u_{\sim} может быть однозначно определена через среднее по поперечному сечению s значение индукции $B_{\text{нсп}}$. При этом нет необходимости в построении истинной картины распределения индукции по сечению s , выявить которое экспериментальным путем практически невозможно. Поэтому равенство (1) используют в виде:

$$u_{\sim} = -\frac{dB_{\text{нсп}}}{dt} \int_s ds = -\frac{d(B_{\text{нсп}}S)}{dt}. \quad (2)$$

Для перехода от u_{\sim} к $B_{\text{нсп}}$ из (2) получаем соотношение:

$$B_{\text{нсп}} = -\frac{1}{S} \int u_{\sim} dt. \quad (3)$$

Если катушка содержит w_{\sim} витков, а потоки рассеяния пренебрежимо малы, связь между $B_{\text{нсп}}$ и $u_{\sim\kappa}$ имеет вид:

$$B_{\text{нсп}} = -\frac{1}{w_{\sim}S} \int u_{\sim\kappa} dt. \quad (4)$$

Переход от токов намагничивающих катушек к напряженности магнитного поля осуществляется по закону полного тока. При этом с некоторым приближением определяется средняя длина магнитной силовой линии $l_{\text{ср}}$, а напряженности магнитного поля вычисляются по формулам:

$$H_{\sim} = \frac{i_{\sim}w_{\sim}}{l_{\text{ср}}}; H_{=} = \frac{i_{=}w_{=}}{l_{\text{ср}}}. \quad (5)$$

Переход от $u_{\sim\kappa}$, i_{\sim} и $u_{=}$ к $B_{\text{нсп}}$, H_{\sim} и $H_{=}$, естественно, зависит от закономерностей изменения величин $u_{\sim\kappa}$ и i_{\sim} во времени. В общем случае эти закономерности определяются параметрами электрической цепи, в которую включена намагничивающая катушка переменного тока, а поскольку в реальных устройствах такие параметры изменяются в широких пределах, формы кривых $u_{\sim\kappa}$ и i_{\sim} могут быть оценены приближенно только на основании интуиции и практического опыта. Поэтому характеристики одновременного намагничивания экспериментально определяются в двух крайних режимах: при синусоидальной форме переменной составляющей индукции или при синусоидальной форме переменной составляющей напряженности магнитного поля. В первом случае из-за нелинейности процесса намагничивания искажается форма переменной составляющей напряженности магнитного поля, во втором – форма переменной составляющей индукции. Для характеристики численных значений переменных составляющих с искаженной формой кривой используются амплитудные, эффективные и средние (за полупериод) величины. Для характеристики численных значений синусоидально изменяющихся переменных используем амплитудные значения колебаний.

В технической литературе представлен большой набор полученных экспериментально кривых одновременного намагничивания в постоянном и переменном продольных электромагнитных полях для различных ферромагнитных материалов, видов магнитопровода, параметров энергии источников намагничивания и т. д. [8 – 10]. Проанализируем такие характеристики с точки зрения возможности их обобщения и выявления общих закономерностей процесса одновременного намагничивания продольными постоянным и переменным электромагнитными полями.

Вьясним, прежде всего, качественные особенности такого перемагничивания. Для упрощения будем считать, что переменные составляющие процесса изменяются с частотами, при которых можно пренебречь диссипативными составляющими, обусловленными вихревыми токами.

Выберем произвольно синусоидальное колебание переменной составляющей индукции с неизменной амплитудой B_m и проследим за траекторией точки, изображающей изменение магнитного состояния в координатах B и H при различных величинах постоянной составляющей индукции B_0 .

Для каждого ферромагнитного материала существует максимальная величина амплитуды ($B_m = B_{ms}$), определяющая при отсутствии постоянной составляющей индукции, так называемую предельную петлю гистерезиса (см. рис. 1).

Если начать рассмотрение с момента времени, когда мгновенное значение колебания переменной составляющей индукции равно нулю, а контролируемый материал полностью размагничен, то траектория изображающей точки будет проходить вначале по первоначальной кривой намагничивания OKA до точки A , а затем совпадет с предельной петлей гистерезиса $ACDEA$ (без учета эффекта релаксации). По предельной гистерезисной петле определяются характерные для каждого ферромагнетика величина остаточной индукции B_r и коэрцитивной силы H_c .

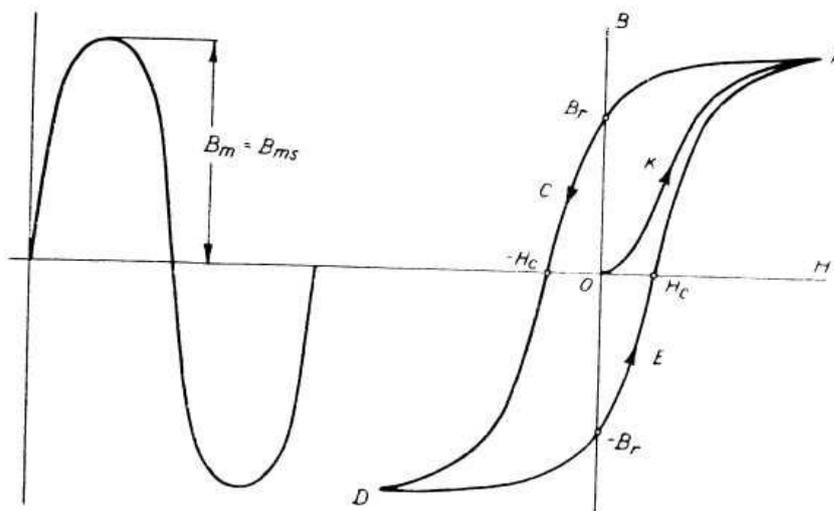


Рисунок 1 – Перемагничивание ферромагнетика по предельной петле гистерезиса

Если $B_{01}=0$ и амплитуды колебаний переменной составляющей индукции $B_m < B_{ms}$, то при тех же начальных условиях изображающая точка также вначале идет по первоначальной кривой намагничивания (рис. 2, участок K'_1K_1), а затем описывает замкнутый частный цикл (петля $k_1m_1b_1n_1k_1$). Частный цикл подобного рода симметричен относительно осей B и H и находится внутри предельной петли гистерезиса. Переменной составляющей индукции $\Delta B = 2B_m$ соответствует строго определенная величина переменной составляющей напряженности магнитного поля ΔH_1 и, следовательно, величина переменной составляющей тока в намагничивающей обмотке.

Рассмотрим случай, когда магнитопровод предварительно намагничивается постоянной составляющей индукции до насыщения, т.е. $B_0 \geq B_{ms}$. При уменьшении величины этой индукции траектория изображающей точки будет проходить по участку размагничивания предельной петли гистерезиса ACD . Пусть, как и ранее, величина постоянной составляющей индукции равна B_0 . Тогда магнитное состояние магнитопровода определится точкой C_3 . При изменении переменной составляющей индукции в первый полупериод изображающая точка опишет предварительную частную петлю $c_3n_3m_3c_3$, затем в следующей четверти периода, когда величина индукции меняется от B_{03} до $B_{03} - B_m$, пройдет по участку обратной ветви

предельной петли гистерезиса (участок C_3C_3), а далее начнет перемещаться по устойчивому несимметричному частному циклу $c_3n_3r_3m_3c_3$. Подобная картина наблюдается и при других величинах постоянной составляющей индукции (циклы при $B_0=B_{0_2}$ и $B_0=B_{0_1}=0$ на рис. 2).

В общем случае в зависимости от амплитуды переменной составляющей индукции B_m , величины и предыстории получения постоянной составляющей индукции B_0 возможны самые разнообразные виды частных циклов. Отметим, что при одновременном продольном намагничивании ферромагнетика постоянным и переменным электромагнитными полями связь между B и H весьма сложна. Из этого следует, что описанные переходы от $u_{\sim k}$, i_{\sim} и $I = k B_{ncp}$, H_{\sim} и H_{\sim} (4) и (5) носят приближенный характер. Действительно, для рассмотренных режимов перемагничивания четкой является лишь связь амплитуды переменной составляющей индукции B с действующим значением напряжения $u_{\sim k \text{ эфф}}$:

$$B_m = \frac{\sqrt{2u_{\sim k \text{ эфф}}}}{\omega \omega_{\sim s}}, \quad (6)$$

где ω – угловая частота.

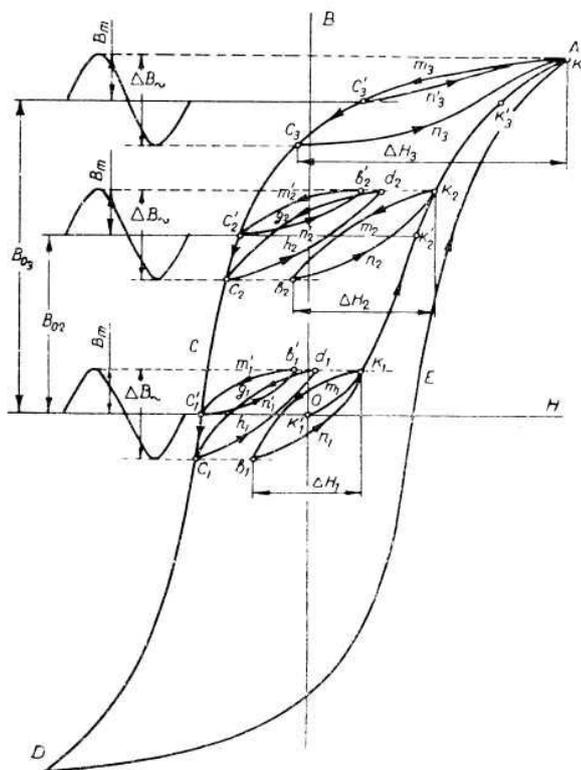


Рисунок 2 – Гистерезисные циклы при одновременном намагничивании переменным и постоянным магнитными полями

Величина H_{\sim} и форма кривой H_{\sim} при заданной величине B_0 могут быть точно определены, если известна траектория частного цикла перемагничивания. Из рис. 2 видно, что при одних и тех же величинах B_m и B_0 можно получить различные формы кривой H_{\sim} (при разных формах траектории частных циклов перемагничивания для двух крайних начальных условий) и различные величины постоянной составляющей напряженности магнитного поля H_{\sim} . Это еще раз подтверждает, что экспериментально полученные кривые одновременного намагничивания в постоянном и переменном продольных электромагнитных полях в большей степени характеризуют изменение электрических параметров цепей электромагнитного устройства, чем изменение магнитного состояния магнитопровода.

Выводы.

1. Учитывая характер и условия эксплуатации судна а также то, что корпус судна выполнен из ферромагнитного материала наиболее информативным параметром контроля механических напряжений корпуса является магнитоупругий эффект регистрация которого, может осуществляться как контактным, так и бесконтактным методом.

2. Разработанные теоретические основы магнитоупругого метода контроля позволили получить статистическую зависимость магнитных свойств ферромагнетика от действующих усилий и установить, что магнитная проницаемость контролируемого материала является основным магнитным параметром определяющим чувствительность преобразователя.

3. При работе магнитоупругого преобразователя одновременно в постоянном и переменном магнитном поле происходит снижение чувствительности преобразователя за счет уменьшения магнитной проницаемости контролируемого материала т.к. рабочая точка на кривой намагниченности ферромагнетики под действием постоянного магнитного поля смещается к области магнитного насыщения. Эта величина носит случайный характер в зависимости от местоположения судна относительно силовых линий магнитного поля Земли.

4. Для поддержания постоянной чувствительности магнитоупругого преобразователя необходимо создавать дополнительное постоянное магнитное поле, величина которого будет равна значению намагниченности контролируемого участка корпуса судна, но противоположна по знаку. Для создания данного поля на магнитной системе магнитоупругого преобразователя необходимо разместить дополнительную обмотку подмагничивания, величина тока в которой определяется с помощью магнитоизмерительной системы позволяющей контролировать остаточную намагниченность участка корпуса судна в месте расположения магнитоупорного преобразователя.

Список использованной литературы

1. Григорьев А.А. Системы контроля напряженного состояния корпуса судна / А.А. Григорьев, Н.Е. Шадобин, Б.Н. Церюльников // Ц.Б.Н.Т.Н., Экспресс-информация, Серия: «Техническая эксплуатация флота». – М., 1980. – № 19 (503). – С. 14 – 17.
2. Короткин Я.И. Волновые нагрузки корпуса судна / Я.И. Короткин, А.Н. Рабинович, Д.М. Ростовцев. – Л.: Судостроение, 1987. – 236 с.
3. Аркадьев В.Н. Электромагнитные процессы в металлах. Ч.2: Магнитное поле / В.Н. Аркадьев. – М., Л.: Главная редакция энергетической литературы, 1936 – 303 с.
4. Механцев Ю.Я. Измерения напряжений по магнитной анизотропии / Ю.Я. Механцев. – М.: ГОСИНТИ, 1964. – 146 с.
5. Шевченко Г.И. Магнитоанізотропні датчики / Г.И. Шевченко. – М.: Энергия, 1967. – 365 с.
6. Новиков В.Ф. Магнитоупругие свойства пластически деформированных и сложнапряжённых магнетиков / В.Ф. Новиков, И.Г. Фатеев. – М.: Недра, 1997. – 196 с.
7. Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники: [учебник для вузов], Том 2 / Л.Р. Нейман, К.С. Демерчан – [3-е изд. перераб. и доп.]. – Л.: Энергглоиздат. Ленинградское отд., 1981. – 416 с.
8. Pantelyat M.G. Numerical analysis of impulse electromagnetic fields in soft ferromagnetic materials / M.G. Pantelyat // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. – 1999. – vol. 10. – P. 185 – 192.
9. Гринберг И.П. Измерители индукции переменных магнитных полей / И.П. Гринберг, Е.А. Шулявский. – К.: Техника, 1982. – 168 с.
10. Преображенский А.А. Магнитные материалы и элементы / А.А. Преображенский, Е.Г. Бишард. – М.: Высшая школа, 1986. – 352 с.
11. Мирошников В.В. Исследования возможности контроля упругих напряжений по величине остаточной намагниченности металла / В.В.Мирошников, О.П. Завальнюк // Вісник

Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: «Електроенергетика та перетворювальна техніка». – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – № 34 (1007). – С. 12 – 17.

References

1. Grigoriev, A.A., Shadobin N.E. and Tserulnikov B.N. (1980), “Monitoring systems of a tension of the casing of the vessel”, *Series “Technical operation of fleet” of Ts.B.N.T.N., Express information*, vol. 19, no. 503, pp. 14 – 17.
2. Korotkin, Ya.I., Rabinovich A.N. and Rostovtsev D.M. (1987), *Volnovye nagruzki korpusa sudna* [Wave loads of the casing of the vessel], Sudostroenie, St. Petersburg, Russia.
3. Arkadyev, V.N. (1936), *Jelektromagnitnye processy v metallah. Vol. 2: Magnitnoe pole* [Electromagnetic processes in metals. Vol. 2: Magnetic field], Glavnaja redakcija jenergeticheskoy literatury, Moscow, St. Petersburg, Russia.
4. Mekhantsev, Yu.Ya. (1964), *Izmerenija naprjazhenij po magnitnoj anizotropii* [Measurements of tension on magnetic anisotropy], GOSINTI, Moscow, Russia.
5. Shevchenko, G.I. (1967), *Magnitoanizotropnye datchiki* [Magnetoanisotropic sensors], Jenergija, Moscow, Russia.
6. Novikov, V.F. and Fateev I.G. (1997), *Magnitoprugie svojstva plasticheski deformirovannyh i slozhnonaprjazhjonnyh magnetikov* [Magnetoelastic properties plastically deformed and the slozhnonaprjazhjonnykh of magnetics], Nedra, Moscow, Russia.
7. Neumann, L.R. and Demerchan K. S. (1981), *Teoreticheskie osnovy jelektrotehniki: [uchebnik dlja vuzov Vol. 2]* [bases of electrical engineering: [the textbook for higher education institutions. Vol. 1], 3rd ed, Energloizdat. Leningrad separation, St. Petersburg, Russia.
8. Pantelyat, M.G. (1999), “Numerical analysis of impulse electromagnetic fields in soft ferromagnetic materials”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 10., pp. 185 – 192.
9. Greenberg, I.P. and Shulyavsky E.A. (1982), *Izmeriteli indukcii peremennyh magnitnyh polej* [Measuring instruments of induction of variation magnetic fields], Tehnika, Kiev, Ukraine.
10. Preobrazhensky, A.A. and Bishard E.G. (1986), *Magnitnye materialy i jelementy* [Magnetic materials and elements], Vysshaja shkola, Moscow, Russia.
11. Miroshnikov, V.V. and Zavalnyuk O.P. (2013), “Researches of possibility of monitoring of elastic stresses on value of residual magnetization of metal”, *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «HPI». Zbirnik naukovih prac'. Serija: «Elektroenergetika ta peretvorjuval'na tehnika»*, vol. 34, no. 1007, pp. 12 – 17.

Поступила в редакцію:
30.03.2015

Рецензент:
д-р техн. наук, проф. А.А. Зори

В.Б.Нестеренко, В.В.Мирошников
Херсонська державна морська академія

Аналіз роботи магнітопружного перетворювача на поверхні корпусу судна. Судна типу ріка-море мають довжину більше 100 метрів, що приводить до намагнічування корпусу до величини (1020 ... 3633) А/м. При встановленні на поверхні корпусу судна магнітопружного перетворювача для контролю величини механічних напружень на контрольовану ділянку корпусу діє одночасно постійне магнітне поле корпусу судна та змінне поле збудження перетворювача. За рахунок постійного струму поля робоча точка на кривій намагнічування зміщується, що веде до зменшення магнітної проникності контрольованого металу і, як наслідок, до зниження рівня чутливості магнітопружного перетворювача. Так для Ст3 і сталь 20 зниження чутливості може сягнути (15 – 23) %, що суттєво нівелює достоїнства

магнітопружних перетворювачів та робить контроль з їхньою допомогою маловірогідним на крупногабаритних об'єктах.

Ключові слова: перетворювач, магнітна проникність, похибка, деформація, петля гістерезису.

V.B. Nesterenko, V.V. Miroshnikov

Kherson State Sea Academy

The analysis of operation of the magnetoelastic transformer on a surface of the casing of the vessel. Monitoring of mechanical stresses of large-size objects is connected to the certain difficulties caused by that all objects of monitoring are in the earth magnetic field. Under the influence of this field they acquire, because of the overall dimensions, rather big value of magnetization which changes magnetic conductivity of controlled metal. When monitoring static objects, influence of the field of Earth will be constant and invariable that quite gives in to the account and compensating. It is necessary to develop special systems capable to trace change of this field for the objects permanently changing the orientation in the earth magnetic field and to create a compensation magnetic field in the field of monitoring. River sea vessels have length more than 100 meters that leads to magnetization of the casing to value (1020...3633) A/m. In case of installation at the same time constant magnetic field of the casing of the vessel and a variation field of excitation of the transformer acts on a surface of the casing of the vessel of the magnetoelastic transformer for monitoring of value of mechanical stresses on a controlled section of the casing. At the expense of a direct current of a field the operation point on a magnetization curve displaces that leads to reduction of magnetic conductivity of controlled metal and as a result, to lowering of level of sensitivity of the magnetoelastic transformer. So for St3 and steel 20 lowering of sensitivity can reach (15 – 23)% that significantly levels advantages of magnetoelastic transformers and does monitoring with their help improbable on large-size objects.

Keywords: transformer, magnetic conductivity, errors, deformation, hysteresis curve.



Нестеренко Владимир Борисович. Украина, окончил Одесский институт инженеров морского флота, капитан дальнего плавания, старший преподаватель кафедры управления судном и безопасности жизнедеятельности на море. Херсонская государственная морская академия (пр. Ушакова 20, г. Херсон, 73000, Украина). Основное направление научной деятельности – исследование устойчивости и безопасности эксплуатации судна.



Мирошников Вадим Владимирович. Украина, окончил Ворошиловградский машиностроительный институт, д-р техн. наук, проф. (кв. Молодежный, 20-а, г. Луганск, 91034, Украина). Основное направление научной деятельности – теоретические и практические аспекты электромагнитного контроля промышленного оборудования.