

УДК: 629.5.083.2

РОБОТИЗИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОСВИДЕТЕЛЬСТВОВАНИЯ ПОДВОДНОЙ ЧАСТИ СУДНА

**В.В. Вельтищев, С.А. Егоров,
М.В. Григорьев, О.И. Гладкова,
Е.В. Баскакова**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»¹

Важнейшим фактором безопасности плавания судов является поддержание исправного технического состояния подводных частей элементов их корпусов. Для присвоения, возобновления или подтверждения класса судна в соответствии с требованиями правил Российского морского регистра судоходства необходимо обязательное освидетельствование данного средства, которое включает обследование его подводной части. Такая инспекция может производиться при нахождении судна не только в сухом доке, но и на плаву. При этом на сегодняшний день переход на безлюдные технологии проведения периодического осмотра указанных подводных объектов становится все более актуальной задачей. Особенности проведения такого типа работ определяют необходимость выработки принципиально новых подходов к созданию специализированных робототехнических подводных средств. В статье сформулированы основные требования к процедуре освидетельствования судна на стадиях оценок износа корпусных конструкций и изменений первоначальной формы корпуса, определения нарушений целостности элементов корпуса и оценки технического состояния судовых устройств. Обоснована концепция создания телеуправляемых подводных средств для проведения сплошного осмотра с определением рационального способа движения и рассмотрением конструктивной схемы модульного аппарата. Описаны принципы построения диагностической аппаратуры, приведен пример функционального состава информационно-управляющей части подводного робототехнического комплекса. По результатам проведенных работ оценены достижимые точности испытанных навигационных систем, сделаны выводы о корректности реализованных алгоритмов, необходимости их совершенствования и внесении модификаций в состав аппаратуры разработанного прототипа подводного телеуправляемого комплекса. Выявлена существующая на сегодняшний день ограниченная практическая применимость роботизированной технологии освидетельствования подводной части судна на плаву и сформулировано необходимое условие для введения её в практику.

ВВЕДЕНИЕ

Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА) все более интенсивно используются в процессе проведения подводных инженерных работ. В частности, обследование подводных трубопроводных систем и других донных объектов уже невозможно без использования робототехнических средств. Относительно новой задачей является техническое обеспечение операций по оценке состояния подводных корпусных конструкций морского судна.

Освидетельствование судна с целью проверки его соответствия

требованиям правил Российского морского регистра судоходства (правил РС) [1] является обязательной процедурой для присвоения/возобновления или подтверждения судном класса РС. При этом одно из требований – освидетельствование подводной части судна. Как правило, дефектация подводной части корпуса и наружных подводных устройств и механизмов проводится при нахождении судна в доке. В отдельных случаях правила Российского морского регистра судоходства допускают выполнение таких работ и на судне на плаву. Такое освидетельствование (освидетельствование подводной

части судна на плаву) выполняется водолазной фирмой, признанной РС, с использованием подводной видеосистемы, приборов для замеров толщин и деформаций корпусных конструкций, аппаратуры неразрушающего контроля, а также инструментов для очистки поверхностей от биологических обрастаний и продуктов коррозии. Весь процесс обследования подводной части проходит по согласованной РС программе и под наблюдением инспектора РС (дистанционный контроль состояния осматривае-

¹ 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1. Тел. (499) 263-61-15. E-mail: sm42@sm.bmstu.ru.

мых объектов по их изображениям на видеомониторе [2]).

Перспективность использования подводных робототехнических средств при дефектации судовых корпусных конструкций достаточно очевидна. Как следует из научно-технической литературы, интенсивные работы с целью решения этой задачи уже проводятся рядом западных компаний. Созданы первые прототипы робототехнических средств, предназначенных для осмотра и инспекции подводных судовых корпусных конструкций. В их число входят телеуправляемые необитаемые подводные аппараты LBC и vLBC (компания «SeaBotix», США), «RovingBAT» («ECA Hytec», Франция), «Hull BUG» («SeaRobotics», США) и автономный аппарат HAUV («Bluefin Robotics», США). В работе [3] описан отечественный ТНПА, способный решать задачи гидроакустической и видеосъемки поверхности корпуса судна. Можно констатировать, что первые доказательства реализуемости отдельных фрагментов новой роботизированной технологии уже получены. Тем не менее проблема обоснования общих принципов построения специализированных подводных робототехнических средств, позволяющих проводить освидетельствование корпусных конструкций без использования водолазов или, по крайней мере, с их минимальным участием, еще ждет своего решения.

1. Общая постановка задачи освидетельствования подводной части судна

Конструкция любого ТНПА определяется его целевой функцией и условиями работы. Сформулируем основные требования к процедуре освидетельствования судна. Существующие норматив-

ные правила [1, 2] регламентируют следующие стадии оценки технического состояния корпусных конструкций:

Оценка износа корпусных конструкций

Под износом понимается уменьшение толщины обшивки судна под воздействием коррозионных процессов, эрозии или механического истирания. Наибольшее распространение имеет коррозионный износ, проявляющийся в виде практически равномерного уменьшения толщины всего корпуса или в форме локальных (местных) утонений отдельных элементов корпуса, вплоть до появления открытых язвенных дефектов. Для объективной оценки общего износа наружной обшивки корпуса в ходе освидетельствования выполняются замеры толщин не менее чем в трех точках на каждом листе обшивки или по одному замеру на каждые 5 м² поверхности корпуса. Основным средством измерения величины износа является прибор, реализующий метод многократного эхозондирования с контактным или бесконтактным способом возбуждения акустической волны. Точность измерения толщин должна быть не менее 0,1 мм. Измерение глубины открытых коррозионных язвин выполняется с помощью глубиномеров с точностью измерений не менее 0,1 мм. В качестве измерительной базы используется образующая обшивки корпуса длиной не менее 300 мм. В большинстве случаев для обеспечения требуемой точности перед измерением износа

часть поверхности корпуса должна быть механически очищена от биологического обрастания или продуктов коррозии. Координаты выявленных областей с локальным износом должны быть зафиксированы для последующей оценки динамики увеличения износа или проведения ремонтных работ.

Оценка изменений первоначальной формы корпуса

Остаточные деформации корпусных элементов возникают в результате механических воздействий: посадки судна на мель, ударов при швартовке, столкновений судов, гидродинамических реакций при движении и т.д. Геометрия деформаций может быть различной. Возникают не только остаточные деформации листа обшивки (бухтины, вмятины, выпучины), но и остаточные прогибы или перегибы корпуса. Основными количественными оценками деформации являются величина максимальной деформации поверхности элемента корпуса относительно исходной геометрии (стрелка прогиба f) и размеры зоны деформации в плане. На практике для измерения деформаций пока что используют простейшие приборы: линейки и глубиномеры. Требуемая точность измерения: для размеров зоны деформаций в плане – не менее 100 мм, для стрелок прогиба на базе 300 мм – не менее 0,1 мм. Важно отметить, что стрелка прогиба должна всегда измеряться относительно исходной геометрии элемента корпуса, как показано на рис. 1.

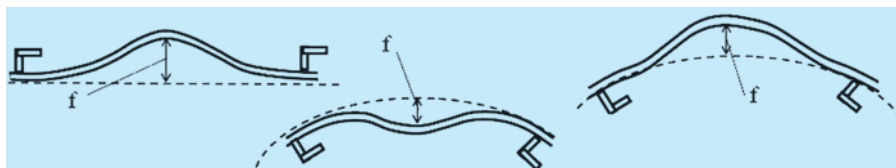


Рис. 1. Схема измерения величины стрелки прогиба элемента корпуса

Определение нарушений целостности элементов корпуса

Трещины и разрывы в обшивке корпуса являются наиболее критическими видами дефектов. Во многих случаях трещины имеют прогрессирующий характер изменений. В процессе освидетельствования судна нарушения целостности выявляются путем визуального осмотра или с использованием различных дефектоскопических методов. Измерение параметров трещины и разрыва проводится на поверхности поврежденного элемента корпуса с помощью измерительного инструмента, обеспечивающего точность измерений не менее 5 мм. В процессе измерений фиксируются: величина раскрытия кромок трещины, длина трещины, её координаты и ориентация относительно строительных координатных плоскостей судна.

Оценка технического состояния судовых устройств

В соответствии с нормативными требованиями Российского морского регистра судоходства при освидетельствовании судна на плаву полнота и достоверность полученных сведений о техническом состоянии подводной части судна должны быть эквивалентны результатам при освидетельствовании в сухом доке. Для соблюдения этих требований в ходе освидетельствования на плаву помимо выявления дефектов корпуса должны быть проведены и дополнительные работы, связанные с оценкой состояния целого ряда судовых устройств. Важнейшими из них являются осмотр видимых частей судового рулевого устройства, главных движителей и подруливающих устройств, навигационного оборудования (гидро-

акустических лагов и эхолотов). Кроме внешнего осмотра должны быть выполнены замеры зазоров в подшипниках баллера руля, проведена дефектоскопия лопастей гребных винтов на предмет отсутствия трещин и других повреждений, измерены зазоры в дейдвудных подшипниках и т.д.

Обобщая приведенные выше данные, можно сформулировать ряд исходных требований к подводному техническому средству, способному реализовать роботизированную технологию освидетельствования. В первом приближении всю совокупность процедур можно разделить на две группы.

К первой группе относятся операции по сплошному осмотру корпуса судна с целью выявления видимых или скрытых дефектов (деформаций, зон повышенного износа, мест нарушения целостности обшивки). Для выполнения таких работ классический технический облик осмотрового ТНПА должен быть дополнен средствами неразрушающего контроля, механическими, гидроакустическими или оптическими измерителями деформаций, устройствами зачистки локальных корпусных элементов перед проведением дефектоскопии. Процедура сплошного осмотра достаточно просто формализуется. Поэтому она может выполняться или полностью автоматически, или в автоматизированном режиме с уточнением оператором или инспектором Российского морского регистра отдельных технологических элементов. Необходимым условием проведения работ этого этапа является высокоточная навигационная привязка выявленных дефектов к судовой криволинейной системе координат. Тогда конечные результаты осмотра, включая видеоизображения поверхности корпуса, могут быть представлены в виде

базы пространственных (координатно привязанных) цифровых данных, ориентированных на последующую обработку, хранение, визуализацию и анализ в специализированной информационной системе – аналоге традиционной геоинформационной системы.

Условия эксплуатации ТНПА в ходе сплошного побортного осмотра корпуса судна достаточно типичны. Малые глубины, возможность и целесообразность организации движения ТНПА в постоянном контакте с корпусом судна – все это существенно облегчает решение поставленной задачи.

Вторая группа включает в свой состав работы по оценке технического состояния подводных судовых устройств. Эти операции выполняются только в заранее известных локальных зонах корпуса судна. Так как кроме внешнего осмотра необходимо проводить замеры зазоров в сопряженных деталях, то на ТНПА должны быть размещены специализированные устройства, например манипуляторы, предназначенные для выполнения измерений в труднодоступных местах. Для осмотра судового устройства с различных ракурсов движительный комплекс должен обеспечивать маневренность ТНПА по всем шести пространственным координатам. Навигационное обеспечение таких работ не так важно, как при сплошном осмотре. В большинстве случаев режим динамического позиционирования ТНПА у инспектируемых судовых устройств не обеспечит необходимые условия для проведения точных измерений. Поэтому в состав ТНПА целесообразно включить дополнительный захватный манипулятор. Очевидно, что такие операции могут быть выполнены только в режиме телеуправления по коман-

дам оператора, а возможности для автоматизации таких работ – минимальны.

Необходимо отметить, что в процессе оценки технического состояния судовых рулей и движителей будет высока вероятность возникновения зацепов или запутывания кабеля аппарата.

Из вышеизложенного следует, что создание универсального ТНПА, способного провести весь комплекс нормативных проверок технического состояния корпусных конструкций, пока является слишком сложной задачей. Представляется целесообразным разделение общего процесса освидетельствования подводной части судна на два этапа, каждый из которых выполняется с использованием отдельного специализированного робототехнического средства.

2. Концепция построения робототехнического комплекса для проведения сплошного осмотра

Выбор рационального способа движения

В процессе освидетельствования ТНПА должен перемещаться по поверхности обшивки корпуса. Принципиально возможны два варианта построения движительного комплекса аппарата для реализации такого режима движения. Первый вариант основан на использовании только классических движителей – гребных винтов. Для уменьшения сил трения при движении по корпусу судна на аппарате могут быть установлены дополнительные опорные ролики.

Альтернативная схема базируется на гибридном использовании и гребных винтов, и колесных движителей. Гребные винты обеспечивают традиционное перемещение ТНПА в толще воды, а движение по поверхности корпуса

реализуется за счет колесных движителей. Нормальная сила прижима, необходимая колесному движителю, создается вертикальными гребными винтами.

Проведем сравнение эффективности традиционной и гибридной схем построения движительного комплекса ТНПА при прямолинейном движении по поверхности корпуса. Будем считать, что все внешние силы, действующие на ТНПА, лежат в плоскости движения xOy . Это позволяет вместо реальной пространственной схемы рассматривать условную схему, приведенную к диаметральной плоскости ТНПА. Расчетные схемы для двух рассматриваемых вариантов представлены на рис. 2. Для корректности сопоставления будем считать, что в качестве привода гребного винта и колесного движителя используется унифицированный электродвигатель. В состав электропривода колесного движителя дополнительно входит редуктор.

Динамику прямолинейного движения ТНПА можно описать уравнением

$$\sum_{j=1}^N P_{xj} = m \frac{dV_x}{dt} + C_x V_x^2 \text{sign}(V_x),$$

где P_{xj} – сила тяги j -го движителя, обеспечивающего движение вдоль продольной оси Ox ; N – число движителей, участвующих в создании суммарной тяги; m – масса аппарата с учетом присоединенных масс воды; V_x – скорость продольных перемещений; C_x – пара-

метр, характеризующий влияние конструктивных характеристик ТНПА на величину гидродинамического сопротивления.

Уравнения электродвигателя представим в виде

$$U = L \frac{dI}{dt} + RI + K_E \omega_\partial,$$

$$M_\partial = K_M I,$$

где U – управляющее напряжение; L, R – индуктивность и активное сопротивление обмотки; I – ток; K_E, K_M – скоростная и моментная постоянные электродвигателя; ω_∂ – частота вращения вала электродвигателя; M_∂ – момент электродвигателя.

В режимах работы, близких к швартовному, без учета гидродинамического взаимодействия с корпусом ТНПА характеристики гребного винта определяются уравнениями:

$$M_\partial = J_{zg} \frac{d\omega_\partial}{dt} + k_g \omega_\partial^2 \text{sign}(\omega_\partial),$$

$$P_{xj} = k_p \omega_\partial^2 \text{sign}(\omega_\partial),$$

где J_{zg} – момент инерции гребного винта с учетом присоединенных масс воды; k_g, k_p – моментная и силовая постоянные гребного винта.

Уравнения колесного движителя без учета его деформации, механических потерь в редукторе, потерь на качение, а также при отсутствии режимов пробуксовки и движения юзом можно представить в виде:

$$M_\partial i = \frac{J_K}{i} \frac{d\omega_\partial}{dt} + \frac{k_K}{i^2} \omega_\partial^2 \text{sign}(\omega_\partial) + P_{xj} r_K,$$

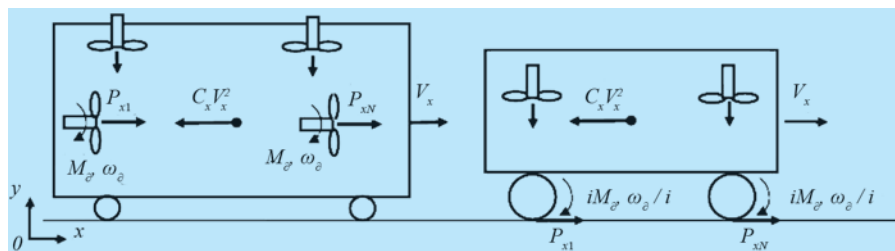


Рис. 2. Варианты движительных комплексов

$$\omega_0 = \frac{iV_x}{r_k}$$

В приведенных уравнениях: i – величина редукции в электроприводе колеса, r_k – радиус колеса; k_k – параметр гидродинамических потерь на колесе.

Рассмотрим условия энергетической эквивалентности двух представленных схем в установившихся режимах движения. Пусть число движителей N , реализующих движение ТНПА по продольной оси в каждой схеме, будет одинаковым.

Силовая эквивалентность обеспечивается при равенстве силы тяги, которую развивают гребной винт и колесный движитель при одинаковой величине момента на валу электродвигателя M_0 . Пренебрегая величиной гидродинамических потерь на колесе, требуемое соотношение параметров движителей двух типов определяем равенством

$$\frac{k_p}{k_g} = \frac{i}{r_k}. \quad (1)$$

Под кинематической эквивалентностью будем понимать случай, при котором при равных значениях ω_0 гребные винты и колесные движители обеспечивают движение ТНПА с одинаковой скоростью V_x . Данное условие достигается при выполнении соотношения

$$\frac{C_x}{Nk_p} = \left(\frac{i}{r_k}\right)^2. \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) следует, что если соотношение радиуса колеса и значения редукции выбрано из (1), то полная эквивалентность двух схем обеспечивается для ТНПА, величина параметра гидродинамического сопротивления которого может быть вычислена по формуле

$$C_x = \frac{Ni^3k_g}{r_k^3}.$$

Для сравнения динамических характеристик двух энергетически эквивалентных вариантов построения движительного комплекса проведем линеаризацию исходных уравнений путем разложения параболических нелинейных функций в ряд Тейлора. Тогда можно получить передаточные функции для малых приращений координат относительно их установившихся значений. Для построения линеаризованной математической модели в качестве типовых режимов выбрано движение ТНПА с малой скоростью ($V_x^0 = 0,1V_{x\max}$) и движение со скоростью, близкой к предельной ($V_x^0 = V_{x\max}$), где V_x^0 – значение скорости в точке линеаризации, $V_{x\max}$ – максимальная продольная скорость ТНПА.

На рис. 3 представлены построенные по линеаризованной математической модели логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики канала управления продольной скоростью ТНПА для рассматриваемых вариантов построения движительного комплекса в типовых режимах движения.

Из вида частотных характеристик следует, что при включении в состав движительного комплекса колесных движителей нелинейные свойства ТНПА как объекта регулирования не влияют на

результатирующие динамические характеристики системы. Полоса пропускания всего канала управления продольной скоростью с колесными движителями практически на два порядка превышает полосу пропускания системы с гребными винтами, что существенно проявляется в режиме движения ТНПА с малыми скоростями.

Достигнутый эффект целиком обусловливается наличием в структуре канала управления с колесными движителями внутренней обратной связи по регулируемой координате V_x .

Конструктивная схема ТНПА

В общем случае создание ТНПА для выполнения специальных работ является длительным и дорогостоящим процессом. Практика проектирования доказывает, что эффективным средством снижения временных и финансовых затрат на разработку является использование модульного принципа конструктивного исполнения ТНПА [4]. В соответствии с таким принципом в конструкции выделяется некоторая неизменяемая часть, которая включает в свой состав обязательные функциональные элементы ТНПА. В результате формируется базовая платформа для размещения сменных специализированных модулей.

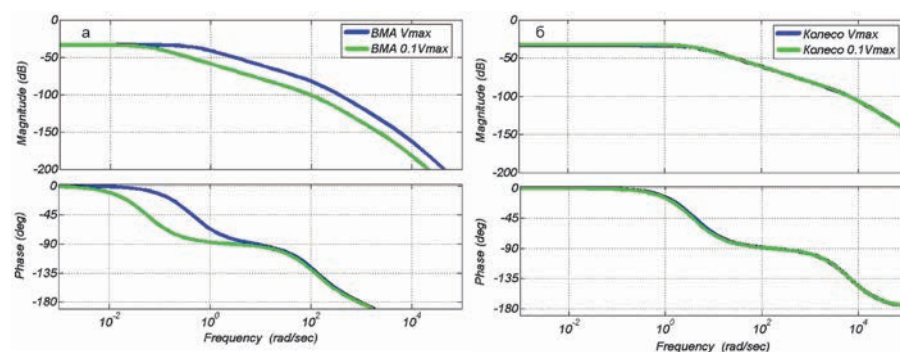


Рис. 3. Логарифмические амплитудные и фазовые характеристики (а – с использованием гребных винтов, б – с колесными движителями)

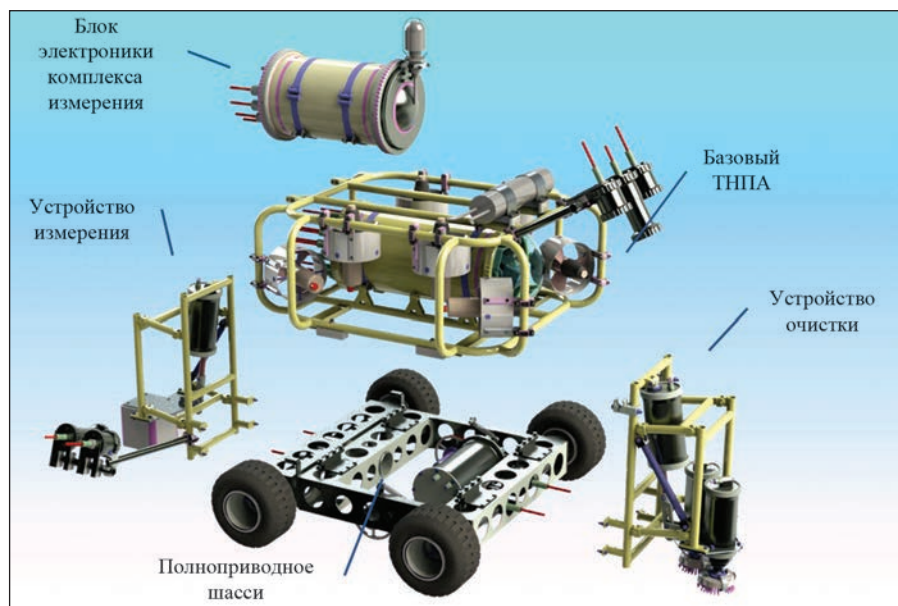


Рис. 4. Конструктивная схема модульного ТНПА

Предлагаемый конструктивно-функциональный состав аппарата изображен на рис. 4.

Базовым модулем является малый осмотровый ТНПА, состав систем которого типичен для технических средств данного класса. Базовый движительный комплекс содержит 8 однотипных винтомоторных агрегатов (гребных винтов с электроприводом). Для достижения специфических возможностей базовый модуль плавающего ТНПА дооснащен полноприводным колесным шасси, измерительным комплексом для проведения ультразвуковой дефектоскопии корпусных элементов и устройством очистки диагностируемых поверхностей. Кроме того, в штатную видеосистему ТНПА включены дополнительные средства визуального контроля процессов зачистки и диагностики.

Функциональный состав информационно-управляющей части подводного робототехнического комплекса

Функциональный состав управляющей части робототехнического комплекса представлен на рис. 5. В состав бортовых измерителей ТНПА входят: цифровой магнитный компас с тремя акселерометрами и тремя магнитометрами в своем составе, три волоконно-оптических датчика угловых скоростей, прецизионный датчик давления для измерения глубины. Линейные перемещения аппарата в режиме движения на колесах определяются по показаниям двух одометров на основе кодовых датчиков, установленных на каждом борту колесного шасси [6].

Для обеспечения требуемой точности определения местоположения ТНПА и координат выяв-

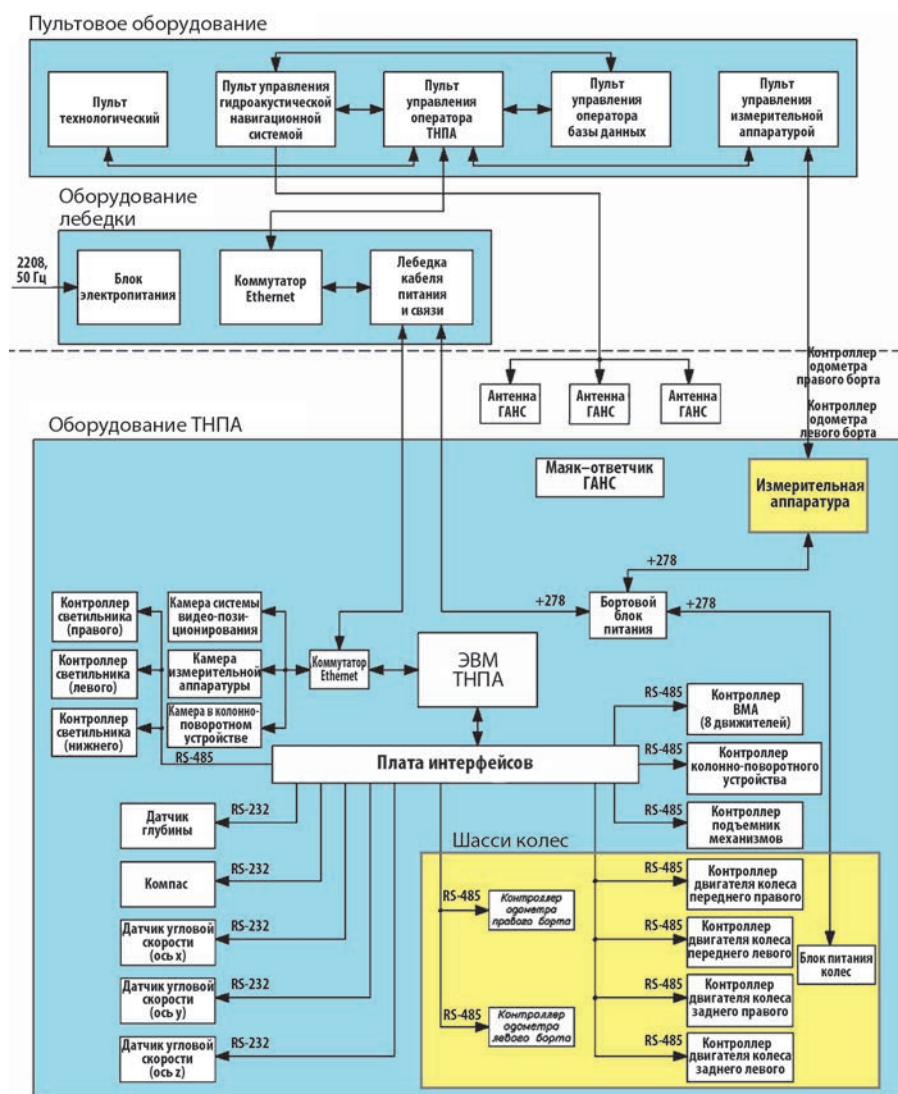


Рис. 5. Функциональная схема информационно-управляющей части робототехнического комплекса

ленных дефектов навигационная задача решается за счет комплексного использования нескольких систем:

- дальномерной гидроакустической навигационной системы с длинной базой, приемники которой опускаются в воду с борта судна;

- одометрической системы счисления пути;

- системы счисления пути, реализующей корреляционно-экстремальный метод обработки видеоизображений (системы видеопозиционирования).

Пультовая часть комплекса содержит: пульт управления ТНПА, пульт управления гидроакустической навигационной системой, пульт управления диагностической аппаратурой, пульт оператора базы диагностических данных. Кроме того, для удобства модификации параметров системы и отработки алгоритмов управления в состав пультовой части включен технологический пульт.

Принципы построения диагностической аппаратуры

Базисом разработанной системы неразрушающего контроля (НК) является использование акустического метода, широко применяемого в настоящее время для измерения толщины и обнаружения дефектов (например, коррозионных трещин) металла различных конструкций. Существующие методики основываются, как правило, на применении продольных волн, возбуждаемых контактным пьезоэлектрическим преобразователем. При этом поверхность контролируемого изделия должна быть специально подготовлена с шероховатостью не хуже $R_z 20$. Учитывая сложность такой под-

готовки поверхности корпуса судна, были выбраны поперечные горизонтально-поляризованные волны, возбуждаемые бесконтактным электромагнитно-акустическим преобразователем (ЭМАП). Результаты проведенных экспериментальных исследований подтвердили целесообразность использования такого метода для контроля изделий с шероховатостью поверхности до $R_z 60$ [5].

Выбранный тип волны также применяется и для НК поврежденных участков контролируемого объекта. Как показали исследования, эффективно использовать метод, при котором критерием наличия коррозионных трещин является ослабление сигнала, отраженного от донной поверхности объекта контроля. В процессе НК фиксируются значения амплитуды четырех донных эхо-сигналов и время их прихода. Падение амплитуды донных эхо-сигналов относительно бездефектной части образца свидетельствует о наличии дефектов в области под преобразователем, а изменение времени – об изменении толщины. Минимальный выявляемый размер коррозионных трещин составляет 1,5–2 мм по глубине. На рис. 6 и 7 представлены видеоизображения донных эхо-сигналов бездефектной и дефектной частей объекта контроля соответственно.

Ширина полосы покрытия 4 датчиков (рис. 8) составляет до 70 мм. Для обеспечения большей ширины необходимо или увеличивать число датчиков, или вводить программное движение ТНПА микрогалсами над поврежденным участком корпуса. Основные характеристики используемых средств представлены в табл. 1.

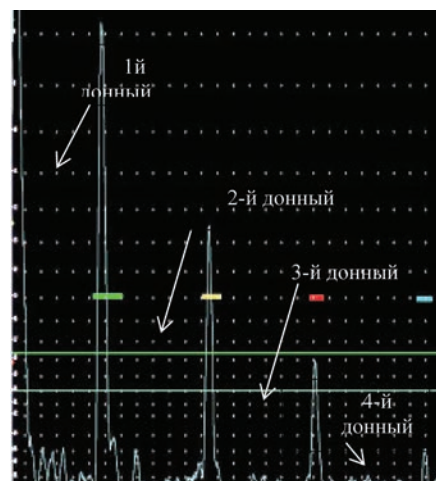


Рис. 6. Видеоизображение бездефектной области поверхности объекта контроля

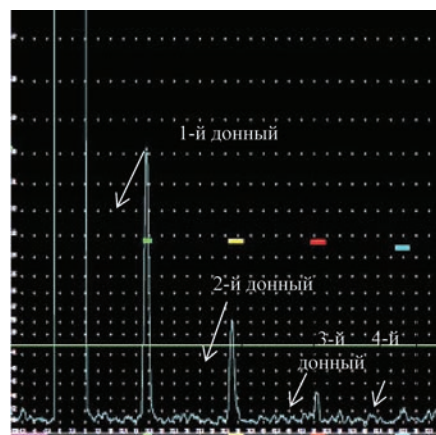


Рис. 7. Видеоизображение дефектной области поверхности объекта контроля



Рис. 8. Общий вид акустической подвески с четырьмя ЭМАП

Таблица 1. Основные характеристики средств неразрушающего контроля

Скорость сканирования в водной среде, м/с	0,8
Количество ЭМАП	4
Количество каналов в каждом из ЭМАП	4
Частота, МГц	5
Угол наклона ЭМАП, град.	0

3. Результаты экспериментальной отработки

Предлагаемые технические решения прошли апробацию в процессе создания в МГТУ им. Н.Э. Баумана прототипа специализированного роботизированного комплекса для освидетельствования подводной части судов на плаву. Внешний вид ТНПА представлен на рис. 9.

Специализированный комплекс успешно прошел испытания в лаборатории и натурную экспериментальную отработку в бассейне (рис. 10), в ходе которой проверялись алгоритмы автоматического движения аппарата на колесных движителях и исследовались различные методы комплексования навигационных систем. Одновременно проводилась оценка эффективности средств неразрушающего контроля на имитаторах корпусных элементов.

Согласно требованиям, предъявляемым к аппарату, для стыковки с корпусом корабля необходима стабилизация больших углов крена и дифферента. Стыковка осуществляется следующим образом: аппарат с нулевыми углами крена и дифферента приближается к корпусу корабля, осуществляет касание с ним колесами одного борта, поворачивается на угол крена более 90 градусов и переключается в режим движения на колесах, в котором четыре вертикальных движителя осуществляют прижим ТНПА к обшивке судна. Альтернативный вариант стыковки предусматривает касание носом или кормой аппарата корпуса корабля и дальнейший поворот ТНПА на угол дифферента до плюс 85 или до минус 85 градусов, дальнейшие действия – аналогичны. В результате отработки алгоритмов локальных контуров системы управления были получены достижимые значения углов дифферента в

диапазоне ± 85 градусов, крена – ± 180 градусов.

Для режима движения на колесах были установлены следующие точностные характеристики: при измерении гироазимутального курса по показаниям прецизионного датчика угловой скорости угловой случайный дрейф составил не более 1 град/ч, погрешность масштаба – не более 1%, погрешность измерения глубины – не более 0,05 м, погрешность счисления пути на прямолинейных отрезках – не более 1,1% (при использовании усредненных показаний одометров и гироазимутального курса), погрешность определения координат на типовой траектории (4 галса, $4 \times 0,5$ м) – не более 16%.

На рис. 11 приведены траектории движения ТНПА микрогалсами с использованием методов наведения (погони, визирования) и управления боковым отклонением.

Качественное совпадение заданных и текущих траекторий движения аппарата позволило сделать вывод о корректности работы реализованных алгоритмов автоматического движения, при этом наилучшие результаты были получены с использованием системы счисления пути на основе средних значений одометров и гироазимутального курса, без коррекции по ГАНС.

Таким образом, по результатам экспериментальной отработки информационно-управляющей системы были определены достижимые точности навигационных систем ТНПА, проверены реализованные алгоритмы, а также выявлены пути дальнейшего совершенствования как алгоритмов, так и аппаратуры.



Рис. 9. Внешний вид ТНПА с гибридным движительным комплексом

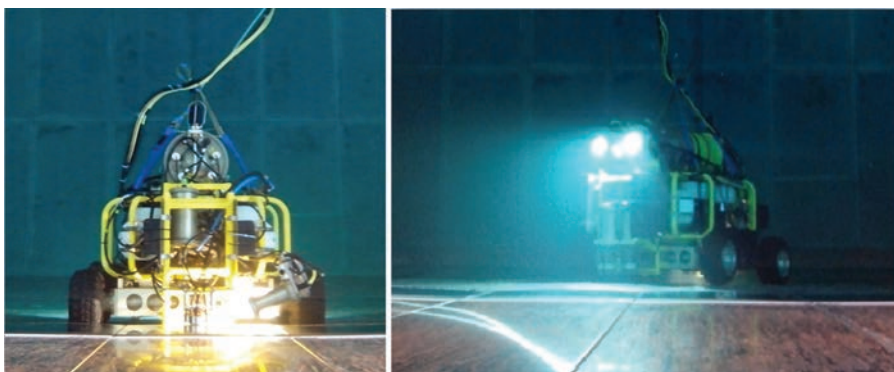


Рис. 10. ТНПА в процессе движения по стене бассейна

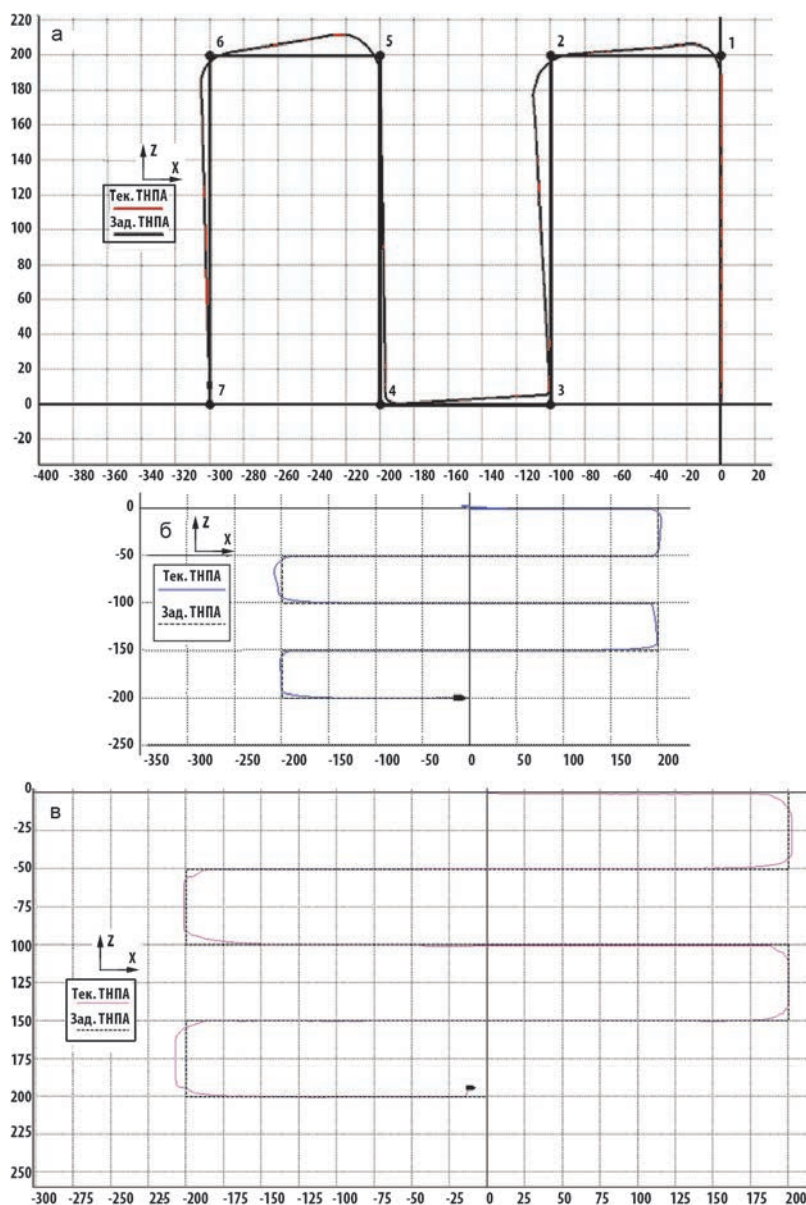


Рис. 11. Заданные и текущие траектории движения ТНПА: а – метод погони, б – метод визирования, в – управление боковым отклонением. Единицы измерения координатной сетки – сантиметры

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов проведенных работ можно сделать ряд выводов о практической применимости роботизированной технологии освидетельствования подводной части судна.

Сопоставляя основные достоинства и недостатки использования новой технологии и водолазов (табл. 2), можно заключить, что ТНПА позволит повысить качество процедуры освидетельствования.

Кроме того, предполагается, что использование подводных робототехнических средств будет особенно эффективно в тех случаях, когда нет задачи освидетельствования действующего устройства в разобранном виде и других судовых подводных устройств, а также при работах в опасных условиях (сильное течение, узости, захламленность акватории, радиационная зараженность воды и др.). При этом необходимым условием для внедрения новой технологии в практику является разработка Российским морским регистром судоходства нормативных правил и инструкций для выполнения работ по освидетельствованию корпусов судов на плаву с использованием подводных робототехнических средств.

Таблица 2. Оценка качества процедуры освидетельствования

Положительные стороны	Отрицательные стороны
• возможность проведения освидетельствования в сложных погодных условиях при качке и течении без ограничения по глубине; • точность навигационной привязки выявленных дефектов; • возможность представления полученных данных в виде электронной базы данных; • возможность формирования единого (мозаичного) изображения поверхности судна; • отсутствие необходимости организации интерактивного взаимодействия между водолазом и инспектором; • отсутствие риска для персонала; • возможность осмотра в недоступных для водолаза зонах; • возможность автоматизации процесса осмотра, включая проведение многократных контрольных замеров в заданных точках корпусных элементов с целью анализа динамики развития дефектов.	• дороговизна используемого оборудования; • опасность зацепов кабеля ТНПА о судовые конструкции, ликвидация которых потребует привлечения водолазов; • невозможность проведения оперативных ремонтных работ непосредственно в ходе освидетельствования; • сложность проведения освидетельствования в ледовых условиях и в условиях недостаточной прозрачности воды; • сложность измерения больших зон деформаций; • сложность или невозможность проведения замеров зазоров в действующем устройстве или просадки гребного вала; • невозможность проведения работ по демонтажу кингстонных решеток, кожухов защиты уплотнения конуса гребного вала и т.п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила классификационных освидетельствований судов в эксплуатации НД № 2-020101-012. СПб.: Рос. мор. регистр судоходства, 2015. 354 с.
2. Руководство по техническому наблюдению за судами в эксплуатации НД № 2-030101-009. СПб.: Рос. мор. регистр судоходства, 2015. 245 с.
3. Матвиенко Ю.В., Борейко А.А., Костенко В.В., Львов О.Ю., Ваулин Ю.В. Комплекс робототехнических средств для выполнения поисковых работ и обследования подводной инфраструктуры на шельфе // Подводные исследования и робототехника. 2015. №1. С. 4–15.
4. Вельтищев В.В. Модульные схемы построения телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов // Современные методы и средства океанологических исследований: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. «МСОИ-2015». Т. 2. М., 2015. С. 42–45.
5. Алешин Н.П., Григорьев М.В., Вельтищев В.В. и др. Мониторинг технического состояния корпусов судов с использованием телеуправляемого подводного аппарата // В мире неразрушающего контроля. 2015. № 3. С. 12–15.
6. Гамазов Н.И., Гладкова О.И., Лямина Е.А., Егоров С.А. Информационно-управляющая система гибридного телеуправляемого подводного аппарата // Современные методы и средства океанологических исследований: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. «МСОИ-2015». Т. 2. М., 2015. С. 209–213.

