СЕКЦИЯ 1

Подводные аппараты и их системы:

автономные, телеуправляемые и буксируемые робототехнические комплексы,

проблемы технологии и эксплуатации.

Практические применения и актуальные задачи развития подводной техники, включая научную, коммерческую и военную области

НАВИГАЦИОННОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТНПА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДОННЫХ ЦЕЛЕЙ И ИНСПЕКЦИИ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ

Ю.В. Ваулин, В.В. Костенко, А.М. Павин

Институт проблем морских технологий ДВО РАН. 690950, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел/факс: (4232) 432416, e-mail: kostenko@marine.febras.ru

В докладе представлена система бортового управления и навигации (СБУН), которая обеспечивает режимы движения телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА), необходимые при идентификации донных целей, а также инспекции гидротехнических сооружений и корпусов кораблей. Приведены результаты натурных испытаний системы в составе ТНПА разработки ИПМТ ДВО РАН.

Введение

Эффективным способом выполнения поисковых и инспекционных работ под водой является использование комплекса, состоящего из автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) и ТНПА. При этом целесообразно последовательное использование аппаратов «АНПА-ТНПА» с координированием их движения в общем поле маяков гидроакустической навигационной системы с длинной базой (ГАНС ДБ).

Типовой сценарий идентификации донной цели с известными географическими координатами состоит из следующих этапов:

• вывод ТНПА по поверхности в окрестность цели по данным спутниковой навигационной системы;

•заглубление аппарата и выход к цели по данным от маяков ДБ ГАНС;

• допоиск цели в ходе обзорно-поисковой съемки дна с помощью гидролокатора секторного обзора (ГСО);

• наведение по ГСО до визуального контакта с целью;

• детальное обследование донной цели с помощью ГСО, видеокамер и фотосистемы.

Увеличение производительности инспектирования гидротехнических сооружений и бездокового освидетельствования корпусов кораблей требует выполнения следующих операций:

•поступательное движение ТНПА вдоль корпуса корабля на заданной дальности обследования со стабилизацией углового положения по сигналам от эхолокационной системы (ЭЛС), доплеровского лага (ДЛ) и навигационных датчиков СБУН;

• определение координат ТНПА относительно корпуса обследуемого корабля на основании данных от ДЛ на поворотной платформе и ЭЛС;

• гидроакустическую съемку поверхности корпуса корабля ГСО;

• фото-телевизионную съемку поверхности корпуса корабля с регулированием угла наклона платформы фото-теле камер в продольно-вертикальной плоскости ТНПА;

•определение координат перемещений ТНПА относительно объекта по данным цифровой фотосистемы;

•передачу на корабль-носитель в реальном времени информации, поступающей от видеокамер и ГСО, а также координат ТНПА относительно корпуса обследуемого корабля, определенных средствами СБУН.

Функциональная схема ТНПА, учитывающая требуемый набор систем необходимых для реализации перечисленных сценариев работы, приведена на рисунке 1.



Рис.1. Функциональная схема ТНПА «МАКС-300 М».

Навигационное обеспечение ТНПА

По своему составу и характеристикам навигационную систему ТНПА целесообразно унифицировать с навигационной системой АНПА. Типовая навигационная система (HC) ТНПА включает в себя магнитный компас, угловые датчики (крен, дифферент), датчики угловых скоростей (рыскание, крен, дифферент) и датчик глубины [1]. Дополнительно в состав HC включен доплеровский лаг (ДЛ), что позволяет производить на борту ТНПА счисление координат, и эхолокационная система. Полный состав HC ТНПА приведен на рис. 2. Для привязки счисленных координат к географическим на ТНПА установлен приемник CHC. Наличие приемника CHC на борту ТНПА позволяет с высокой точностью подводить аппарат к месту погружения по поверхности, например к координатам цели, полученным после ГБО съемки местности произведенной АНПА.

Отличительной особенностью НС ТНПА «МАКС-300М» является наличие на борту приемопередатчика ГАНС ДБ. ТНПА имеет возможность работать в одном маяковом поле с АНПА. На основе информации об измеренных дальностях до маяков-ответчиков ГАНС ДБ на борту ТНПА осуществляется коррекция счисленных координат. Таким образом, на ТНПА «МАКС-300М» реализуются алгоритмы комплексированной навигационной системы, что позволяет существенно повысить точность измерения координат на борту ТНПА и организовывать автоматическое приведение аппарата в точку с заданными географическими координатами.



Рис.2. Навигационная система ТНПА «МАКС-300М»

Другой особенностью НС ТНПА является развитая эхолокационная система (ЭЛС). Развитая ЭЛС необходима, чтобы обеспечить возможность высокоточного позиционирования и координатной привязки данных измерений в ходе инспектирования донных сооружений и корпусов судов. ЭЛС ТНПА «МАКС-300М» включает в себя четыре локатора. Кроме данных от ЭЛС в алгоритмах позиционирования ТНПА используются и данные от четырех антенн доплеровского лага. На рис.3-4 показана схема расположения лучей ЭЛС и ДЛ.



Рис. 3. Конфигурация лучей ЭЛС и ДЛ ТНПА (вид сбоку)

Направленный вниз локатор DD предназначен для измерения дистанции до дна. Он используется для стабилизации вертикального отстояния ТНПА от грунта как при обследовании донных объектов, так и при осмотре корпусов судов, причальных стен и пр.



Рис. 4. Конфигурация лучей ЭЛС ТНПА (вид сверху, антенны ДЛ направлены вверх)

Передние локаторы DR и DL – предназначены для стабилизации горизонтального отстояния аппарата до осматриваемого объекта. На основе данных от этих локаторов вычисляется угловое положение ТНПА в горизонте относительно осматриваемой вертикальной поверхности, а также дистанция до нее. Локатор DU предназначен для измерения дистанции вверх. Используется для организации движения ТНПА подо льдом или в полостях. Локатор DU устанавливается в специальном кронштейне, позволяющем при необходимости изменять его угол наклона.

Для измерения углового положения ТНПА относительно корпуса судна кроме данных ЭЛС от DR и DL также используются четыре дистанции, измеренные ДЛ. Антенны ДЛ на ТНПА «MAKC-300M» расположены на управляемой поворотной платформе, аналогично HROV "Bluefin" [2]. Благодаря такому техническому решению стало возможным направлять ДЛ на осматриваемый объект и измерять скорость относительно объекта. Это может быть полезно, например, при осмотре корпуса судна, когда судно находится в дрейфе, а результаты фото и видео съемки необходимо привязать к системе координат, связанной с корпусом судна (рис. 5).



Рис. 5. Использование ДЛ на поворотной платформе для стабилизации ТНПА при осмотре вертикальных и наклонных поверхностей

Во время движения аппарата антенны ДЛ ориентируются перпендикулярно корпусу судна в автоматическом или ручном режиме (рис. 5, рис. 6). На основе данных от ДЛ (четыре дальности до корпуса и две скорости движения относительно него), определяются координаты ТНПА относительно судна. Также измеряется угловое положение ДЛ и самого аппарата относительно корпуса: α - курсовой угол, β - угол наклона в вертикальной плоскости (рис. 6). Углы наклона антенн ДЛ (DL1, DL2, DL3, DL4) равны 30° относительно осевой линии корпуса блока антенн ДЛ.



Рис. 6. Угловое положение ДЛ и самого аппарата относительно корпуса судна

Кроме варианта с простым счислением координат по данным ДЛ, и датчика глубины, при осмотре подводных сооружений можно использовать схему с применением маяка-

ответчика (МО) ГАНС (рис. 6). В этом случае МО размещается стационарно на линии осмотра объекта на заранее известном расстоянии. НС ТНПА по данным дальнометрии ГАНС производит вычисление дистанций до МО и своего положения в системе координат, привязанной к объекту осмотра. В промежутках между излучениями ГАНС координаты вычисляются по данным ДЛ и навигационных датчиков.



Рис.6. Позиционирование ТНПА относительно корпуса судна с применением МО ГАНС

Наличие в составе оборудования цифровой фото-системы позволяет организовать высокоточное измерение линейных и угловых перемещений аппарата относительно характерных объектов как на грунте, так и на обследуемой поверхности. При этом становится возможной реализация высокоточного перемещения ТНПА относительно инспектируемых объектов в режиме детальной видео-фото съемки.

Алгоритмы управления движением ТНПА

Упомянутое выше навигационное обеспечение позволило реализовать следующие режимы автоматического движения ТНПА командным уровнем СБУН:

• автоматическое приведение по поверхности в точку с заданными географическими координатами;

• автоматическое приведение в толще воды в точку донной поверхности с заданными географическими координатами;

• автоматическое движение в толще воды по заданной траектории при обследовании донной поверхности;

• автоматическая инспекция подводных сооружений и корпусов кораблей вертикальными и горизонтальными галсами;

• динамическое позиционирование аппарата над объектом по данным цифровой фото-системы.

Известно, что ТНПА как объект управления представляет собой сложную нелинейную многосвязную динамическую систему высокого порядка, практически не поддающуюся аналитическому исследованию [3]. Однако, наличие контура угловой стабилизации ТНПА «Макс-300М» по крену и дифференту позволяет принять допущение о малости значений параметров углового движения $\omega_x = \omega_z = \theta = \psi = 0$ и упростить классическую математическую модель динамики подводного аппарата до вида системы (1), принятой при конструировании регуляторов движения исполнительного уровня СБУН. При этом межканальные влияния

были представлены как возмущения. В данном случае были выбраны ПД регуляторы в каналах позиционного регулирования (глубина, курс, крен и дифферент) и П регуляторы в каналах регулирования маршевой и лаговой скорости. Основными критериями выбора этих регуляторов, в первую очередь, явились их простота построения и использования, а так же легкость в настройке и прозрачность процесса функционирования.

$$\begin{cases} (m + \lambda_{11}) \cdot \dot{V}_x + k_x^{zc} \cdot V_x \cdot |V_x| = F_x + F_x^d + T_{ax}, \\ (m + \lambda_{22}) \cdot \dot{V}_y + k_y^{zc} \cdot V_y \cdot |V_y| = F_y - Q + T_{ay}, \\ (m + \lambda_{33}) \cdot \dot{V}_z + k_z^{zc} \cdot V_z \cdot |V_z| = F_z + F_z^d + T_{az}, \\ (J_x + \lambda_{44}) \cdot \dot{\omega}_x + k_\theta^{zc} \cdot \omega_x \cdot |\omega_x| - m \cdot y_c \cdot g \cdot \theta = M_x + M_x^d, \\ (J_y + \lambda_{55}) \cdot \dot{\omega}_y + k_\varphi^{zc} \cdot \omega_y \cdot |\omega_y| = M_y + M_y^d, \\ (J_z + \lambda_{66}) \cdot \dot{\omega}_z + k_\psi^{zc} \cdot \omega_z \cdot |\omega_z| - m \cdot y_c \cdot g \cdot \psi = M_z + M_z^d, \\ \dot{\theta} = \omega_x, \ \dot{\phi} = \omega_y, \ \dot{\psi} = \omega_z, \\ \dot{\xi} = V_x \cdot \cos\varphi + V_z \cdot \sin\varphi, \ \dot{\eta} = V_y = -\dot{H}, \ \dot{\zeta} = -V_x \cdot \sin\varphi + V_z \cdot \cos\varphi; \end{cases}$$
(1)

где: *m* – масса ТНПА; J_x , J_y , J_z – осевые моменты инерции; λ_{ii} – присоединенные массы (i = 1, 2, 3), и присоединенные моменты инерции (i = 4, 5, 6); V_x , V_y , V_z и ω_x , ω_y , ω_z – составляющие соответственно линейных и угловых скоростей движения ТНПА в связанной $k_{x}^{2c}, k_{y}^{2c}, k_{z}^{2c}, k_{\theta}^{2c}, k_{\theta}^{2c}, k_{w}^{2c}$ СК; – метацентрическая высота; _ коэффициенты y_c гидродинамического сопротивления; F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z – управляющие воздействия ДРК; T_{ax}, T_{ay}, T_{az} – проекции натяжения ходового конца кабеля в связанной системе координат; θ , φ , ψ – углы крена, курса и дифферента, соответственно; $F_x^d = -(m + \lambda_{33}) \cdot V_z \cdot \omega_v$, $F_z^d = (m + \lambda_{11}) \cdot V_x \cdot \omega_y, \qquad M_x^d = -m \cdot y_c \cdot \dot{V}_z + m \cdot y_c \cdot (V_x \cdot \omega_y - V_y \cdot \omega_x), \qquad M_y^d = (\lambda_{11} - \lambda_{33}) \cdot V_x \cdot V_z,$ $M_z^d = -m \cdot y_c \cdot \dot{V_x} - (\lambda_{22} - \lambda_{11}) \cdot V_x \cdot V_y + m \cdot y_c \cdot (V_z \cdot \omega_y - V_y \cdot \omega_z)$ возмущения, обусловленные взаимовлиянием каналов управления через динамику ТНПА; Q – остаточная плавучесть аппарата; $\dot{\xi}, \dot{\eta}, \dot{\zeta}$ – скорости движения центра масс аппарата в неподвижной системе координат.

Сочетания регуляторов в каналах управления исполнительного уровня СБУН для некоторых режимов использования ТНПА приведены в таблице.

	Режим использования ТНПА			
	Обследование донной поверхности	Обследование подводных сооружений горизонтальными галсами	Обследование подводных сооружений вертикальными галсами	
Pervirgtop	$U_x = U_x^{\circ} \cdot sign(u_x),$ если $\mu_x \ge U_x^{\circ};$	$U_x = U_x^{o} \cdot sign(u_x),$ если $\mu_x \ge U_x^{o};$	$U_x = U_x^{\rho} \cdot sign(u_x),$ если $u_x \ge U_x^{\rho};$	
маршевой	$U_x = u_x$, если $ u_x < U_x^o$;	$U_x = u_x$, если $ u_x < U_x^{o}$;	$U_x = u_x$, если $ u_x < U_x'$;	
скорости	$u_{x} = K_{\partial x} \cdot K_{xx} \cdot (V_{x2} - V_{x})$	$u_{x} = K_{xx} \cdot K_{xx} \cdot (L_{xx} - L_{x})$	$u_{x} = K_{xx} \cdot K_{xx} \cdot (L_{xx} - L_{x})$	
	$U_{y} = U_{y}^{o} \cdot sign(u_{y}), u_{y} \ge U_{y}^{o};$	$U_{y} = U_{y}^{o} \cdot sign(u_{y}), u_{y} \ge U_{y}^{o};$	$U_{y} = U_{y}^{o} \cdot sign(u_{y}), u_{y} \ge U_{y}^{o};$	
Регулятор глубины	$U_y = u_y$, если $u_y < U_y^o$;	$U_y = u_y$, если $u_y < U_y^o$;	$U_y = u_y$, если $ u_y < U_y^o$;	
	$u_{y} = K_{nH} \cdot [K_{H} \cdot (H_{z} - H) - K_{H} \cdot K_{\partial H} \cdot \dot{H}]$	$u_{y} = K_{nH} \cdot [K_{H} \cdot (H_{z} - H) - K_{H} \cdot K_{\partial H} \cdot \dot{H}]$	$u_y = K_{nH} \cdot K_{H'} \cdot (\dot{H}_z - \dot{H})]$	
Регулятор	$U_{z} = U_{z}^{o} \cdot sign(u_{z}), u_{z} \ge U_{z}^{o};$	$U_{z} = U_{z}^{o} \cdot sign(u_{z}), u_{z} \ge U_{z}^{o};$	$U_{z} = U_{z}^{o} \cdot sign(u_{z}), u_{z} \ge U_{z}^{o};$	
лаговой	$U_{z} = u_{z}$, если $\left u_{z} \right < U_{z}^{o}$;	$U_{z} = u_{z}$, если $\left u_{z} \right < U_{z}^{o}$;	$U_z = u_z$, если $ u_z < U_z^o$;	
скорости	$u_{z} = K_{\partial x} \cdot K_{xz} \cdot (V_{zz} - V_{z})$	$u_{z} = K_{\partial x} \cdot K_{xz} \cdot (V_{zz} - V_{z})$	$u_{z} = K_{\partial n} \cdot K_{nz} \cdot (0 - V_{z})$	
	$U_{\theta} = U_{\theta}^{o} \cdot sign(u_{\theta}), u_{\theta} \ge U_{\theta}^{o};$	$U_{\theta} = U_{\theta}^{o} \cdot sign(u_{\theta}), u_{\theta} \ge U_{\theta}^{o};$	$U_{\theta} = U_{\theta}^{o} \cdot sign(u_{\theta}), u_{\theta} \ge U_{\theta}^{o};$	
Регулятор креня	$U_{\theta} = u_{\theta}$, если $ \mu_{\theta} < U_{\theta}^{o}$;	$U_{\theta} = u_{\theta}$, если $ u_{\theta} < U_{\theta}^{o}$;	$U_{\theta} = u_{\theta}$, если $ u_{\theta} < U_{\theta}^{o}$;	
nponte	$u_{\theta} = K_{\pi\theta} \cdot [K_{\theta} \cdot (0 - \theta) - K_{\theta'} \cdot K_{\delta\theta} \cdot \dot{\theta}]$	$u_{\theta} = K_{\pi\theta} \cdot [K_{\theta} \cdot (0 - \theta) - K_{\theta'} \cdot K_{\delta\theta} \cdot \dot{\theta}]$	$u_{\theta} = K_{\pi\theta} \cdot [K_{\theta} \cdot (0 - \theta) - K_{\theta} \cdot K_{\delta\theta} \cdot \dot{\theta}]$	
	$U_{\varphi} = U_{\varphi}^{o} \cdot sign(u_{\varphi}), u_{\varphi} \ge U_{\varphi}^{o};$	$U_{\varphi} = U_{\varphi}^{o} \cdot sign(u_{\varphi}), u_{\varphi} \ge U_{\varphi}^{o};$	$U_{\varphi} = U_{\varphi}^{o} \cdot sign(u_{\varphi}), u_{\varphi} \ge U_{\varphi}^{o};$	
Регулятор курса	$U_{\varphi} = u_{\varphi}$, если $ u_{\varphi} < U_{\varphi}^{o}$;	$U_{\varphi} = u_{\varphi}$, если $ u_{\varphi} < U_{\varphi}^{o}$;	$U_{\varphi} = u_{\varphi}$, если $ u_{\varphi} < U_{\varphi}^{o}$;	
	$u_{\varphi} = K_{n_{\varphi}} \cdot [K_{\varphi} \cdot (\varphi_{2} - \varphi) - K_{\varphi'} \cdot K_{\delta \varphi} \cdot \dot{\varphi}]$	$u_{\varphi} = K_{\pi_{\varphi}} \cdot [K_{\pi_{\varphi}} \cdot \Delta L_{\chi} - K_{\varphi'} \cdot K_{\delta_{\varphi}} \cdot \dot{\varphi}]$	$u_{\varphi} = K_{n\varphi} \cdot [K_{n\varphi} \cdot \Delta L_{x} - K_{\varphi'} \cdot K_{\partial \varphi} \cdot \dot{\varphi}]$	
	$U_{\boldsymbol{w}} = U_{\boldsymbol{w}}^{o} \cdot \operatorname{sign}(u_{\boldsymbol{w}}), \left u_{\boldsymbol{w}} \right \ge U_{\boldsymbol{w}}^{o};$	$U_{\boldsymbol{w}} = U_{\boldsymbol{w}}^{o} \cdot \operatorname{sign}(u_{\boldsymbol{w}}), \left u_{\boldsymbol{w}} \right \ge U_{\boldsymbol{w}}^{o};$	$U_{\boldsymbol{y}} = U_{\boldsymbol{y}}^{o} \cdot sign(u_{\boldsymbol{y}}), u_{\boldsymbol{y}} \ge U_{\boldsymbol{y}}^{o};$	
Регулятор дифферента	$\left U_{\boldsymbol{y}} = u_{\boldsymbol{y}},$ если $\left u_{\boldsymbol{y}} \right < U_{\boldsymbol{y}}^{o};$	$U_{\boldsymbol{y}} = u_{\boldsymbol{y}}$, если $ u_{\boldsymbol{y}} < U_{\boldsymbol{y}}^{o}$;	$U_{\boldsymbol{w}} = u_{\boldsymbol{w}}$, если $ u_{\boldsymbol{w}} < U_{\boldsymbol{w}}^{o}$;	
	$u_{\psi} = K_{x\psi} \cdot [K_{\psi} \cdot (0 - \psi) - K_{\psi'} \cdot K_{\delta \psi} \cdot \psi]$	$u_{\psi} = K_{x\psi} \cdot [K_{\psi} \cdot (0 - \psi) - K_{\psi'} \cdot K_{\delta \psi} \cdot \psi]$	$u_{\psi} = K_{\pi_{\psi}} \cdot [K_{\psi} \cdot (0 - \psi) - K_{\psi'} \cdot K_{\delta_{\psi}} \cdot \psi]$	

Результаты натурных испытаний

Целью испытаний являлось проверка навигационного и алгоритмического обеспечения ТНПА «МАКС-300М» при работе в реальных условиях в комплексе с поисковым АНПА. Предварительно в районе натурных испытаний была развернута ГАНС ДБ из трех МО. На первом этапе средствами АНПА была произведена ГБО съемка донной поверхности. При этом навигация АНПА осуществлялась в режиме с коррекцией счисленных координат по данным ГАНС ДБ (см. рис. 7)



Рис. 7. Траектория движения АНПА во время предварительной ГБО съемки района

На втором этапе производились запуски ТНПА. При этом относительная система координат, в которой работала НС ТНПА, была привязана к системе координат, в которой велась ГБО съемка района. На рис. 8 показан скрин планшета ТНПА с картой местности и изображением участка ГБО съемки.



Рис. 8. ГБО изображение цели привязывается к карте района на графическом планшете оператора ТНПА. Координаты ТНПА во время движения в реальном масштабе времени транслируются на планшет оператора, что упрощает задачу вывода ТНПА в район поиска.

С целью испытания методики поиска объекта в окрестностях заданных координат и проверки алгоритмов вывода ТНПА в заданную точку в автоматическом режиме был осуществлен следующий эксперимент. В толще воды установлена мишень (рис. 9)



Рис. 9. Мишень – уголковый отражатель

ТНПА погрузился на глубину поиска к мишени и в ручном режиме был отведен от нее на расстояние порядка 100 м. Далее ТНПА получил в качестве целеуказания точку с координатами (0, -25) находящуюся на расстоянии 35 м от мишени (рис. 10). Такое

расстояние было выбрано, чтобы смоделировать ситуацию, когда точность привязки целей по результатам ГБО съемки АНПА имеет некоторую ошибку. От точки с координатами (0, - 25) к мишени ТНПА двигался в ручном режиме с наведением на цель по показаниям локатора ГСО.



Рис.10. Траектория движения ТНПА от судна к мишени и обратно по данным навигационной системы с коррекцией от ГАНС ДБ

На рис. 11 показано, как выглядит мишень на экране ГСО в процессе наведения ТНПА на цель. На рис. 12 приведена фотография с видеоизображениями с камер ТНПА в момент выхода аппарата на визуальный контакт с мишенью.



Рис.11. Приближение к цели с наведением по ГСО (дистанция 4 м)



Рис. 12. Выход на визуальный контакт с мишенью

Навигационная погрешность измерения координат на ТНПА в момент фиксации визуального контакта с мишенью составила 1,5 м. Результаты проведенного эксперимента подтвердили, что применение на ТНПА развитой навигационной системы с возможностью счисления координат по данным от ДЛ, пилотажных датчиков и ГАНС ДБ позволяет значительно упростить работу по поиску и обнаружению объектов с известными географическими координатами.

Кроме описанных экспериментов, в ходе натурных испытаний ТНПА был проведен ряд успешных запусков с целью проверки возможности управления ТНПА в полностью автоматическом режиме по заданной программе. То есть, в ходе этих запусков ТНПА функционировал в режиме выполнения миссии, как полностью автономный аппарат. При этом оператор мог в любой момент прервать выполнение миссии и взять управление на себя. Такой режим может быть применен, например, для площадной фотосъемки дна.

Выводы

•Для эффективного решения задач идентификации средствами ТНПА целей, обнаруженных АНПА, целесообразно использование на аппаратах идентичных навигационных систем с наличием ГАНС ДБ и приемника спутниковой навигационной системы.

•Автоматизация инспекции подводных сооружений и корпусов кораблей вертикальными и горизонтальными галсами требует оснащения ТНПА эхолокационной системой и доплеровским лагом на поворотной платформе.

•Наличие комплексированных навигационных данных о координатах ТНПА на поверхности и в толще воды позволило автоматизировать режимы движения аппарата к цели с известными географическими координатами.

•Цифровая фото-система ТНПА на поворотной платформе может обеспечить измерение перемещений аппарата относительно идентифицируемых объектов в режиме динамического позиционирования.

•В ходе натурных испытаний подтверждена возможность выхода ТНПА в окрестности цели с известными географическими координатами с дальнейшим допоиском и сближением по данным от бортового гидролокатора секторного обзора до визуального контакта.

Литература

1. Robert D. Christ, Robert L. Wernly SR. The ROV Manual: A user guide for observation class remotely operated vehicles. 2007, Published by Elsevier Ltd.

2. F.S. Hover, J. Vaganay, M.L. Elkins, S. Willcox, R.S. Damus, S. Desset, J.P. Morash, V.C. Polidoro. Ship hull inspection by hull-relative navigation and control. Proc. IEEE, 2005.

3. Пантов Е.Н. и др. Основы теории движения подводных аппаратов /Е.Н. Пантов, Н.Н. Махин, Б.Б. Шереметов. – Л.: Судостроение, 1973.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ВИДЕОПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА

А.Н. Кропотов, А.А Макашов, В.М. Плясунов, Е.И. Сахарова

Научно-исследовательский институт специального машиностроения Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана, 105005, Москва, Госпитальный пер., 10. тел.: (499) 2636114, факс: (499) 2636115, e-mail: sm42@sm.bmstu.ru

В докладе рассматриваются различные подходы к решению задачи позиционирования подводного аппарата посредством цифровой обработки видеосигнала, получаемого с размещенной на нем видеокамеры. Проведен анализ точностей позиционирования, достигаемых различными методами, степени робастности методов, а также их вычислительной эффективности.

Одной из актуальных задач, стоящих перед разработчиками подводных аппаратов (ПА), является обеспечение возможности высокоточного позиционирования аппарата вблизи объекта работ. Применение современных методов цифровой обработки видеоизображения, получаемого с видеоподсистем, входящих в состав всех используемых в настоящее время подводных аппаратов, позволяет решать задачу позиционирования ПА в автоматизированном режиме. Необходимым требованием является наличие визуального контакта с донной поверхностью или некоторым объектом работ.

Изменение видеоизображения с течением времени интерпретируется как перемещение подводного аппарата, вычисленные параметры движения используются для замыкания контуров системы управления движением подводного аппарата. Достигаемая при этом точность позиционирования, в большинстве случаев, превосходит получаемую с использованием традиционных датчиков, и характеризуется отсутствием уходов ПА с течением времени.

В докладе, методы обработки изображения, которые могут быть использованы при решении задачи видеопозиционирования аппарата, в условиях отсутствия априорной информации о наблюдаемых объектах, разделены на три группы:

1) Методы, основанные на прямом пиксельном анализе изображений

2) Методы, основанные на слежении за характерными объектами сцены

3) Методы, основанные на анализе изображения в частотной области

Первая группа методов предполагает анализ изображения в целом, используется информация об изменениях значений яркостей всех пикселей изображения, которая затем интерпретируется как движение видеокамеры. Как правило, эти методы являются достаточно вычислительно емкими, их применение в системах реального времени требует некоторой дополнительной информации или допущений о характере движения аппарата. К данной группе относятся методы, основанные на вычислении взаимной корреляции участков кадра, а также различные методы оценки оптического потока.

Разработанная в 2008 году в НИИСМ система обработки телевизионной информации (СОТИ) была построена на базе модифицированного метода Лукаса-Канаде [1], представляющего собой один из методов оценивания оптического потока. Для навигации использовалась специальная стереопара направленная вертикально вниз, перпендикулярно опорной поверхности (например, дну).

Данный метод предполагает выделение на некотором опорном кадре, полученном ранее, яркостных неоднородностей, представляющих собой квадратные ячейки размера csize*csize, где csize = 4 ... 32 пикселя, обладающих достаточно высокой относительной контрастностью. Затем данные неоднородности ищутся на текущем кадре, и определяются

их перемещения, за время прошедшее между получением кадров, для чего ищется экстремум функционала схожести, представляющий собой модуль разности:

$$F(a,b) = \sum_{x=n}^{x+n} \sum_{y=m}^{y+m} f(x, y, a, b)$$
(1),

$$f(x, y, a, b) = |Video(x+a, y+b) - Sample(x, y)|$$
(2),

где Video(x, y) — яркость текущего кадра в точке (x, y); Sample(x, y) — яркость опорного кадра в точке (x, y); m, n = csize / 2 — половина размера ячейки по соответствующей координате, пиксел.

Форма данного функционала схожести вблизи экстремума может быть аппроксимирована конической поверхностью [1], что позволяет находить экстремум с помощью простого итерационного поиска, используя в качестве начального приближения его положения прогноз, основанный на допущении об инерционности ПА в условиях водной среды. Таким образом, вычисление данного функционала производится в небольшом числе точек (до 8 точек на каждую выделенную неоднородность), что дает значительный выигрыш в производительности данного метода, например, по сравнению с прямым подсчетом корреляции.

Далее межкадровые смещения яркостных неоднородностей интерпретируются как трехмерное движение видеокамеры с четырьмя степенями свободы, тремя линейными: ΔX_к, ΔY_к, ΔZ_κ, в системе координат связанной с камерой и одной угловой Δφ_к — по углу поворота камеры относительно оси Z_к, перпендикулярной плоскости кадра.

Для каждого объекта (яркостной неоднородности) можно записать 2 уравнения:

$$\begin{cases} \Delta x_{i} = \left(\frac{\Delta X_{\hat{e}}}{Z_{\hat{e}}} + x_{i}\cos\theta_{\hat{e}} + y_{i}\sin\theta_{\hat{e}}\right)\frac{Z_{\hat{e}} + \Delta Z_{\hat{e}}}{Z_{\hat{e}}}, & i = 1..N; \\ \Delta y_{i} = \left(\frac{\Delta Y_{\hat{e}}}{Z_{\hat{e}}} + x_{i}\sin\theta_{\hat{e}} - y_{i}\cos\theta_{\hat{e}}\right)\frac{Z_{\hat{e}} + \Delta Z_{\hat{e}}}{Z_{\hat{e}}}, & i = 1..N; \end{cases}$$
(3),

где $\Delta X_{\hat{e}}, \Delta Y_{\hat{e}}, \Delta Z_{\hat{e}}$ - перемещение камеры в связанной с ней системе координат, $\theta_{\hat{e}}$ - поворот камеры вокруг оси, перпендикулярной плоскости кадра, x_i , y_i - экранные координаты объектов на опорном кадре, $\Delta x_i, \Delta y_i$ - экранные межкадровые смещения объектов, $Z_{\hat{e}}$ - расстояние до опорной поверхности.

Таким образом, получаем переопределённую систему уравнений с четырьмя неизвестными, $\Delta X_{\hat{e}}, \Delta Y_{\hat{e}}, \Delta Z_{\hat{e}}, \Delta \theta_{\hat{e}}$ и числом уравнений, равным удвоенному числу выделенных яркостных неоднородностей. Она решается методом наименьших квадратов, находится величина перемещений камеры, которая пересчитывается как движение ПА. Расстояние до опорной поверхности $Z_{\hat{e}}$ может быть определено с помощью метода параллакса [1], с использованием второй камеры стереопары, или получено с внешнего датчика.

Рассмотренный метод позволяет достигать субпиксельной точности определения координат, выполняясь при этом в режиме реального времени на вычислительном модуле, размещенном на борту аппарата. Разработанные образцы СОТИ успешно прошли государственные испытания в реальных морских условиях. Погрешность позиционирования аппарата при использовании данного метода составляет порядка 1.5% от пройденного пути, и при этом не зависит от прошедшего времени. Основным недостатком рассмотренного метода является недостаточная устойчивость к неравномерной освещенности кадра, что предъявляет высокие требования к обеспечению подсветки а также размещению светильников и видеокамеры.

Вторая группа методов предполагает выделение на изображении некоторых объектов, представляющих собой геометрические примитивы, построение их параметрического

описания, и дальнейшее нахождение их на последующих кадрах. Предполагается соответствие выделенных примитивов реальным физическим объектам, что позволяет определить трехмерное движение аппарата относительно них.

Для работы в условиях подводной среды целесообразно выделение и последующее распознавание точечных особенностей, т.к. при отсутствии в поле зрения камеры объектов искусственного происхождения число наблюдаемых контурных особенностей и характерных областей, как правило, недостаточно для устойчивой работы алгоритма. В НИИСМ было проведено моделирование работы алгоритмов, построенных на основе точечных дескрипторов, на различных наборах данных: тестовых съемках произведенных на стенде в лаборатории, аэрофотосъемках, съемках в тестовом бассейне и на реальных морских съемках. Были исследованы методы BRIEF, SIFT, SURF [2], ORB, BRISK [3] и FREAK. На рисунках 1 и 2 представлено сопоставление двух повернутых изображений потолка лаборатории с помощью методов FREAK и BRISK. Кружками обозначены выделенные особенности, линиями соединены сопоставленные особенности между двумя повернутыми кадрами.



Рис. 1. Сопоставление изображений потолка лаборатории, до и после поворота, произведенное с помощью метода FREAK



Рис. 2. Сопоставление изображений потолка лаборатории, до и после поворота, произведенное с помощью метода BRISK

Видно, что метод FREAK в рассмотренных лабораторных условиях неправильно находит выделенные особенности на последующем кадре. BRISK при данных условиях работает корректно.

На рисунках 3 и 4 представлено сопоставление двух смещенных изображений дна испытательного бассейна с помощью методов BRISK и SURF. Видно, что в условиях слабоконтрастных изображений, приближенных к реальным морским условиям, работа метода BRISK существенно менее устойчива чем работа SURF.

По результатам исследований, выяснено, что для использования в условиях подводной съемки, из выше перечисленных методов, достаточную робастность обеспечивают только SIFT и SURF, однако скорость их работы недостаточно высока и может обеспечивать частоту замыкания системы порядка 1 Гц.



Рис. 3. Сопоставление изображений дна испытательного бассейна, до и после сдвига, произведенное с помощью метода BRISK



Рис. 4. Сопоставление изображений дна испытательного бассейна, до и после сдвига, произведенное с помощью метода SURF

Сочтено целесообразным продолжить исследования дескриптора BRISK, работающего менее устойчиво, но способного обеспечить частоту замыкания порядка 12 Гц. В настоящее время, дескриптор SURF используется при осуществлении видеосклейки для построения фотопланов донной поверхности, в режиме постобработки.

Третья группа методов предполагает анализ изображений с пространственно-частотной точки зрения. Для перехода в область пространственных частот используется преобразование Фурье или его обобщения, такие как вейвлет-преобразование. Изменения между получаемыми изображениями вызванные движением камеры могут быть вычислены путем анализа изменения фазы преобразования Фурье от изображения.

Исследование применимости данных методов при работе со слабоконтрастными изображениями морского дна, содержащими, в основном, низкочастотную составляющую, приводятся в НИИСМ в настоящее время.

При работе ПА вблизи искусственных сооружений, зачастую, присутствует априорная информация о характере наблюдаемых объектов. Использование этой информации может позволить существенно повысить точность позиционирования.

Разрабатываемая в настоящее время в НИИСМ система видеопозиционирования (СВП) телеуправляемого необитаемого подводного аппарата предназначена в.т.ч. для автоматизации процесса стыковки аппарата со специальными донными станциями. Для реализации данного режима на поверхность донной станции, рядом со стыковочным узлом,

будут нанести маркеры специального вида (см. рисунок 5). При попадании в кадр данные маркеры будут автоматически распознаваться, для чего используется обобщенное преобразование Хафа [4]. Далее, методом наименьших квадратов будет решена переопределенная система уравнений, связывающая вычисленные параметры распознанных маркеров с линейными и угловыми координатами ТНПА относительно стыковочного узла.



Рис. 5. Пример распознанного маркера специального вида

СВП будет способна в реальном времени вычислять 3 линейных координаты (x, y, z) и 3 угла ориентации стыковочного узла относительно ТНПА, в связанной с ТНПА системе координат. Расчетная точность определения линейных координат составляет ± 5 мм, точность определения угловых координат $\pm 2.2^{\circ}$. Вычисленные координаты и углы ориентации будут использованы для индикации оператору, а также для замыкания контуров системы управления движением, что позволит произвести автоматическую стыковку с донной станцией, по команде оператора.

В настоящее время НИИСМ проводит исследование применимости современных методов сопоставления кадров, основанных на выделении признаков. Для работы в условиях подводной съемки, наиболее перспективными считаются методы SURF и BRISK. Анализируется применимость методов построенных на вейвлет-преобразовании. В настоящее время, они пока не превосходят по точности и робастности модифицированный метод Лукаса-Канаде, применявшийся ранее. Также ведутся работы над системой стыковки, использующей искусственные маркеры и ее испытания.

Литература

1. М.Ю. Артюхов, А.Н. Кропотов, А.А. Макашов и др. (2011) Опыт создания системы локальной видеонавигации для подводных аппаратов // Техническое зрение в системах управления мобильными объектами-2010: Труды научно-технической конференциисеминара. М.: КДУ, 2011. с 230 – 242.

2. Bay H. и др. Speeded-up robust features (SURF) // Computer vision and image, 2008. T. 110. № 3. C. 346-359

3. Leutenegger S., Chli M., Siegwart R. BRISK: Binary Robust invariant scalable keypoints // 2011 International Conference on Computer Vision. 2011. C. 2548-2555.

4. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В и др. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий. – М.: Физматкнига, 2010. - 672 с.

5. Кропотов А. Н., Макашов А. А., Сахарова Е. И., Плясунов В. М. Построение видеомозаики на основе слабоконтрастных изображений донной поверхности. // Современные методы и средства океанологических исследований, XIII международная научно-техническая конференция: Материалы конференции. – М.: изд-во «АПР», 2013, с. 73-76

Л.А. Наумов, И.Н. Боровик, А.И. Боровик

Институт проблем морских технологий ДВО РАН. 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел /факс: (423) 215545, e-mail: bor@marine.febras.ru

В докладе описывается одна из последних разработок ИПМТ - автономный необитаемый подводный аппарат ММТ-2012.

В 2012 году в ИПМТ на программно-аппаратной базе существующего АНПА «Малый Морской Технолог 2000» («ММТ-2000») был разработан и испытан аппарат «ММТ-2012», представляющий собой усовершенствованную версию родительского аппарата. Приведем основные технические характеристики робота:

1. Максимальная рабочая глубина – 3000 м.;

2. Вес на воздухе – 280 кг.;

3. Габариты – 305х58х100 см. (с антенной радиомодема), 305х58х75 см. (без антенны);

4. Максимальная скорость движения – 1.8 м/с;

5. Время автономной работы – 20 часов;

6. Навигационное оборудование (базовая комплектация):

а. плата пилотажных датчиков XSens MTi-300 AHRS [1];

b. доплеровский лаг (пр-во ИПМТ);

с. эхолокационная система (пр-во ИПМТ);

d. датчик глубины (пр-во ИПМТ);

е. гидроакустическая навигационная система (ГАНС), производства ИПМТ;

f. приемник GPS;

7. Средства связи с пультом оператора на сопровождающем судне:

а. гидроакустическая система связи (ГАСС) на расстоянии до 11 км;

b. радиомодем на расстоянии до 15 км;

с. Wi-Fi соединение на расстоянии до 200 метров;

d. Ethernet 100BASE-TX (100 Мб/с) при нахождении аппарата на борту носителя.

8. Вычислительная база – два одноплатных промышленных компьютера LiPPERT Cool LiteRunner-LX800

9. Исследовательское оборудование:

а. Программно-аппаратный комплекс многолучевого эхолота производства фирмы Kongsberg (Geoacoustics), состоящий из компьютера с предустановленным программным обеспечением, двух антенн приемо-передатчика и датчика скорости звука [2];

b. Профилограф производства ИПМТ;

с. Мультисенсорная видеокамера Arecont Vision AV3135 [3];

d. Электромагнитный искатель производства ИПМТ;

Основные задачи, для которых планируется использовать ММТ-2012:

• Поиск и обследование затонувших объектов;

• Инспекция подводных сооружений и коммуникаций, в том числе трубопроводов и электрических кабелей;

• Геологоразведочные работы, включающие фото-, а также гидроакустическую и профилографическую съемку рельефа морского дна;

• Тестирование и апробация аппаратных и программных решений, разрабатываемых в ИМПТ ДВО РАН.

Преимуществами аппарата ММТ-2012 перед аналогами являются небольшой вес и малые габариты при сравнительно высокой дальности хода и большом количестве

установленного исследовательского оборудования. Современный многолучевой эхолот и видеокамера, установленные на аппарате, позволяют получать высококачественную информацию о рельефе дна и придонных объектах.

В октябре 2012 года аппарат успешно прошел комплекс морских испытаний в бухте Патрокл (Рис. 1, 2). В настоящий момент ведутся работы по модернизации программного обеспечения робота и отладке режимов работы бортового оборудования и движительнорулевого комплекса.



Рисунок 1. Внешний вид аппрата ММТ-2012

Планируемые усовершенствования аппарата:

• Установка современных аккумуляторных батарей с большей емкостью;

• Замена движительной системы аппарата на вариант с двумя маршевыми и одним поворотным двигателем;

• Установка новой системы управления, построенной на базе программной платформы RCE [4,5];

• Интеграция программного комплекса системы технического зрения в систему управления аппаратом.



Рисунок 2. Аппарат ММТ-2012 на испытаниях в бухте Патрокл, 2012 год

Отдельные технические и программные решения, используемые в ММТ-2012, планируется в дальнейшем защитить патентом.

Литература

Режим 1. MTi 100-series [Электронный pecypc] XSens / _ доступа: http://www.xsens.com/en/general/mti-100-series, свободный. - Загл. с экрана. - Яз. англ. Maritime [Электронный ресурс] /Kongsberg 2. Kongsberg Режим доступа: _ http://www.km.kongsberg.com/, свободный. - Загл. с экрана. - Яз. англ.

3. AV3135 [Электронный ресурс] / Arecont Vision - Режим доступа: http://www.arecontvision.com/product/MegaVideo+Series/AV3135. - Загл. с экрана. - Яз. англ

4. Наумов Л.А., Боровик А.И., Баль Н.В. «RCE – программная платформа для системы управления АНПА» // Подводные исследования и робототехника. -2011. №2(12). –С. 18-25

5. Боровик А.И., Наумов Л.А. «Компонентно-ориентированная программная платформа для автономных мобильных роботов» // Известия ЮФУ. -2013. №3. –С. 39-47

РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АНПА ПРИ РАБОТЕ НА МЕЛКОВОДЬЕ

В.В. Костенко, О.Ю. Львов, И.Г. Мокеева

Институт проблем морских технологий ДВО РАН. 690950, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел/факс: (423) 243-24-16, e-mail: lvov@marine.febras.ru

АНПА как инструмент для выполнения поисково-обследовательских работ имеет неоспоримые достоинства: высокая стабильность движения для получения видеогидроакустических изображений, батиметрии, картографирования и т.п. Отсутствие высокоскоростного информационного канала связи АНПА с обеспечивающим судном для получения данных в реальном времени существенно ограничивает возможности аппарата, особенно при выполнении работ в мелководных районах с глубиной до 30-50 м.

Средства расширения функциональных возможностей АНПА

Для расширения возможности связи с аппаратом в реальном времени, а также для повышения точности навигации АНПА, может быть применен всплывающий буксируемый поверхностный модуль (БПМ), который движется за автономным аппаратом и связан с ним информационным кабелем (см. рис. 1-а). Всплывающий БПМ с навигационными и другими радиоантеннами (GPS, Wi-Fi, UHF) был разработан Brooke Ocean Technology, установлен и испытан на АНПА Bluefin-12 (см. рис.1-б). Бортовая лебедка аппарата содержит 30 м коаксиального кабель-троса диаметром 2 мм [1].



Рис. 1. АНПА с буксируемым поверхностным модулем: a) структура буксируемой системы б) АНПА Bluefin-12 с БПМ во время тестирования

Эффективность такого технического решения очевидна при обследовании протяженных объектов (десятки километров), когда для навигационного обеспечения АНПА требуется многократное изменение длиннобазовой гидроакустической системы (перестановка и координирование маяков-ответчиков). Для навигационного обеспечения решения такой задачи эффективна мобильная одномаяковая гидроакустическая система [2, 3]. В случае применения буксируемого модуля функции мобильного маяка выполняет приемник спутниковой навигационной системы, установленный на БПМ.

Буксируемый по поверхности модуль может быть оснащен:

• аппаратурой скоростной радиосвязи, обеспечивающей двухсторонний информационный обмен с судном-носителем со скоростью 150-200 Мбит/с на дистанциях до 300 м (Wi-Fi, ненаправленная радиоантенна);

•аппаратурой УКВ радиосвязи, обеспечивающей двухсторонний информационный обмен с судном-носителем со скоростью 115 кбит/с на дистанциях до 7 км (ненаправленная радиоантенна);

• аппаратурой космической радиосвязи (Гонец, Иридиум), обеспечивающей пакетную передачу сообщений в управляющий центр из любой точки океана;

• приемником спутниковой навигационной системы (СНС) GPS/ГЛОНАСС, обеспечивающим определение координат модуля и навигационную коррекцию АНПА;

• акустическим синхронным излучателем, обеспечивающим совместно с УКБпеленгатором АНПА точную навигационную привязку;

• видеокамерой, позволяющей организовать режим виртуального перископа;

• проблесковым светомаяком.

Комбинация вышеперечисленной аппаратуры в буксируемом по поверхности модуле позволит решать задачи, свойственные буксируемым и телеуправляемым аппаратам:

• функции буксируемого аппарата (получение фото, видео, гидролокационных изображений в реальном времени на борту судна);

• функции телеуправляемого аппарата (детальное обследование объектов с помощью гидролокатора секторного обзора, видеокамер и т.п.).

Комбинация приемника СНС БПМ и навигационной системы УКБ АНПА позволит существенно повысить точность навигационного обеспечения АНПА. Оснащенный проблесковым светомаяком буксируемый модуль может быть использован при спускоподъемных операциях АНПА. БПМ может выступать как дополнительная опция для АНПА и подстыковываться герморазъемом к бортовой системе управления, так и штатным оборудованием АНПА с бортовой лебедкой и электроприводом для кабеля связи. В этом случае обеспечивается периодическая скрытная коррекция координат АНПА и передача информации по каналам космической радиосвязи без всплытия АНПА на поверхность.

Варианты реализации БПМ определяются способом передачи информации и типом кабеля связи.

В варианте системы с оптокабелем (см. рисунок 2) АНПА и БПМ комплектуются оптомодемами, обеспечивающими объединение локальных вычислительных сетей (ЛВС) Ethernet 10/100 аппарата и модуля. Кроме того, БПМ комплектуется автономным источником питания. К достоинствам этого варианта можно отнести отсутствие электрических линий связи (обрыв или затекание кабеля не приведет к выходу из строя аппаратуры АНПА), помехозащищенность канала связи. Недостатками этого варианта являются необходимость времени работы АНПА и БПМ, дополнительные трудозатраты согласования по автономного обслуживанию источника питания БПМ. Вариант системы с оптоэлектрическим кабелем (см. рисунок 2) отличается от предыдущего отсутствием автономного источника питания.

В варианте системы с электрическим кабелем (см. рисунок 3) информационный и энергетический обмен могут обеспечить адаптеры PowerLine только по двум проводам.

Вопросы технической реализации БПМ

Существенное влияние на конструктивный облик БПМ оказывает тип кабеля связи с АНПА. В таблице 1 приведены варианты кабеля связи.



Рис. 2 Структура БПМ с оптоэлектрическим/оптическим кабелем



Рис. 3 Структура БПМ с электрическим кабелем

Габлица	1. Варианты	кабелей связи	и АНПА – БПМ.
---------	-------------	---------------	---------------

Наименование	Параметры	Вес в морской воде q, кг/км
Оптоволоконный кабель A01-03OC-SLS/900	Наружный диаметр Ø 3.0 мм	2.0
Коаксиальный грузонесущий кабель КГГМ 1К-50-1,0-1 (Псковгеокабель)	Наружный диаметр Ø 4.2 мм Разрывное усилие, не менее 1 кН Максимальное давление 30 кг/см2	4.5
Оптоволоконный грузонесущий кабель ОК-4Е-5 (Псковгеокабель)	Четыре одномодовых волокна Наружный диаметр Ø 4.5 мм Разрывное усилие, не менее 5 кН	6.7

Варианты исполнения БПМ приведены ниже в таблицах 2 – 4 и зависят как от типа кабеля связи, так и от состава используемой аппаратуры.

Таблица 2. Состав аппаратуры БПМ-1 оптическим кабелем и его основные технические характеристики (размещается в цилиндрическом контейнере Ø 150х500 мм)

Состав аппаратуры БПМ	Потребляемая мощность, Вт	Габариты, мм	Масса, кг
 1 Оптомодем ОТ-V2E1-T/R 2 Коммутатор Ethernet PRV-1059 3 Приемник СНС ГеоС-1 с антенной АСНП-2М 4 Преобразователь интерфейса Ethernet- СОМ ХРогт[™] 5 Беспроводная точка доступа WL- 330N3G 6 Аккумуляторная батарея PL-1055275- 7S-TM 	9.7	91x96x60	3.35
7 Вторичный источник питания THD 15- 2411N TRACO (вход 18-36 В, к.п.д. 90%)	15 (5B/3A)	32x20x10	0.015

Характеристики автономного источника питания БПМ определяются продолжительностью работы АНПА и потребляемой мощностью аппаратуры БПМ. Исходя из автономности АНПА 24-30 ч и к.п.д. преобразования вторичного источника питания БПМ 80%, для БПМ потребуется источник энергии 300-370 Вт*ч. Этим требованиям удовлетворяет полимерная литий-ионная аккумуляторная батарея **PL-1055275-7S-TM**, которая обеспечит продолжительность работы БПМ-1 43 ч.

Таблица 3. Состав аппаратуры БПМ-2 с электрическим кабелем и его основные технические характеристики (размещается в цилиндрическом контейнере Ø 120х300 мм)

Состав аппаратуры БПМ	Потребляемая	Габариты,	Macca,
	мощность, Вт	ММ	КГ
 1 Адаптер PowerLine TL- PA2010 2 Коммутатор Ethernet PRV-1059 3 Приемник СНС ГеоС-1 с антенной АСНП-2М 4 Преобразователь интерфеса Ethernet-COM XPort™ 5 Беспроводная точка доступа WL-330N3G 	8.7	91x96x60	0.65
6 Вторичный источник питания AMEL10-5SMAZ AIMTEC (вход 90-220 В, 50-440 Гц, к.п.д. 77%)	10 (5B/2A)	57x31x25	0.07

Результаты моделирования движения комплекса АНПА-БПМ

Для оценки влияния кабеля на движение комплекса АНПА-БПМ было выполнены расчеты с помощью прикладной программы ZONA [4]. Данная программа позволяет

определять силовое воздействие кабеля связи на АНПА и БПМ при их движении в стационарном потоке. Полученные в ходе моделирования результаты сведены в таблицу 4. В ходе моделирования были приняты следующие исходные данные:

- скорость движения привязной системы "АНПА-кабель связи-БПМ» 1 м/с;
- длина кабеля связи 60 м;
- форма корпуса БПМ цилиндрическая с полусферическими законцовками (рис. 4);
- коэффициент гидродинамического сопротивления всех вариантов БПМ Сх=0.28 [5].
- •



Рис. 4. Расчетная схема определения реакции кабеля связи на АНПА и БПМ

Вариант БПМ		Глубица	Реакция кабеля, Н			
		Тлубина		БПМ		АНПА
_		<i>I</i> , М	$T_x(E)$	$T_y(E)$	$T_x(A)$	$T_{y}(A)$
БПМ-1 ((кабель	20	3,7	20	25	3
A01-03OC-		30	3,7	40	45	12
SLS/900)						
БПМ-2 ((кабель	20	6,0	31	33	4
КГГМ 1К-50)-1,0-1)	30	6,0	56	55	14

Таблица 4. Результаты расчета сил, действующих на БПМ и АНПА, от кабеля связи

Дополнительные требования к движительно-рулевому комплексу АНПА

Очевидный интерес представляют дополнительные требования к движительнорулевому комплексу (ДРК) АНПА, возникающие при буксировке поверхностного модуля. В качестве оценки этих требований в части маршевых движителей можно использовать коэффициент дополнительной тяги ДРК *К*_{дт}, определяемый по соотношению

$$K_{\mathcal{A}T} = \frac{T_x(A)}{R_x} \cdot 100,$$

где: $T_x(A)$ – реакция ходового конца кабеля связи, R_x – гидродинамическое сопротивление АНПА – буксировщика. Обе силы определяются для скорости движения привязной системы $V_x=1$ м/с, а $T_x(A)$ – для глубины движения АНПА 20 м при длине кабеля 60 м. Силу гидродинамического сопротивления АНПА вычисляем по формуле [6]:

$$R_x = C_x \cdot \frac{\rho \cdot V_x^2}{2} \cdot U^{2/3},$$

где: C_x – коэффициент гидродинамического сопротивления АНПА, ρ – плотность воды, V_x – скорость движения, U – водоизмещение аппарата.

В таблице 5 показаны результаты расчета коэффициента дополнительной тяги ДРК для двух типов АНПА разработки ИПМТ – «Клавесин-1Р» (C_x =0,08 и U=3,1 м³) и «МТ-2010» (C_x =0,08 и U=0,41 м³) [7].

Таблица 5. Результаты расчета коэффициента дополнительной тяги ДРК

	D	$T_x(A), \mathrm{H}$		$K_{arDeta T}$, %	
Класс АНПА	$\Lambda_x,$	БПМ-1	БПМ-	БПМ-	БПМ-
	п		2	1	2
«Клавесин-1Р»	87	33	25	38	28
«MT-2010»	24	33	25	138	104

Анализ результатов расчета вертикальной реакции ходового конца кабеля $T_y(A)$ показывает, что в зависимости от глубины движения АНПА для разных вариантов исполнения БПМ ее значение лежит в диапазоне 3÷14 Н. При этом ориентировочное значение угла схода кабеля с АНПА β можно определить по формуле

$$\beta = arctg[T_{y}(A)/T_{y}(A)].$$

Результаты расчета угла β приведены в таблице 6.

Таблица 6. Результаты расчета угла схода кабеля с АНПА

	Глубина	Реакция ходового конца кабеля. Н		Угол схода кабеля с
Вариант ЫІМ	<i>Y</i> , м	$T_x(A)$	$T_y(A)$	AΗΠA β ,
				град
БПМ-1 (кабель А01-03ОС-	20	25	3	6,8
SLS/900)	30	45	12	14,9
БПМ-2 (кабель КГГМ 1К-	20	33	4	6,9
50-1,0-1)	30	55	14	14,3

Выводы

• Буксируемый по поверхности модуль в составе АНПА расширяет функциональные возможности подводного комплекса, повышает точность навигации и эффективность поисково-обследовательских работ в мелководных районах.

• Основные возмущения, действующие на АНПА в процессе буксировки БПМ, определяются кабелем связи. Поэтому основным требованием при выборе кабеля связи АНПА с БПМ является его минимальный диаметр.

• БПМ с оптическим кабелем является наиболее безопасным техническим решением с точки зрения обеспечения живучести АНПА.

• При проектировании ДРК АНПА, буксирующего БПМ, необходимо учитывать реакцию ходового конца кабеля связи не только в горизонтальном, но и в вертикальном направлении.

• Дополнительные затраты энергии на буксировку поверхностного модуля с кабелем связи 60 м при скорости движения аппарата 1 м/с на глубине 20 м не превышают 140% для АНПА типа «МТ-2010» с водоизмещение 0,41 м³.

• При проектировании ДРК и узла стыковки кабеля связи БПМ с АНПА необходимо учитывать малые углы схода кабеля с аппарата, которые составляют для принятых технических решений 6÷15 град относительно продольной оси.

• Особое внимание следует уделить форме и водоизмещению БПМ, который должен обеспечивать буксировку своих антенн в надводном состоянии во всем диапазоне скоростей движения АНПА. При этом БПМ должен имеет запас плавучести не менее 60 Н.

Литература

1. http://www.sea-technology.com/features/2011/0511/towed_antenna.php

2. Сергеенко Н.С. и Щербатюк А.Ф. (ИПМТ ДВО РАН, ДВФУ), Дубровин Ф.С. (ДВФУ) НЕКОТОРЫЕ АЛГОРИТМЫ ГРУППОВОЙ НАВИГАЦИИ АНПА С ОДНИМ МОБИЛЬНЫМ МАЯКОМ// В настоящем сборнике.

3. M. Fallon, G. Papadopoulos, J. Leonard and N. Patrikalakis. Cooperative AUV Navigation using a Single Maneuvering Surface Craft. Journal of Robotics Research, 29(12), October, 2010, pages 1461-1474.

4. Костенко В.В., Мокеева И.Г. Исследование влияния кабеля связи на маневренность телеуправляемого подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. 2009, №1(7). С. 22-27.

5. Егоров В.И. Подводные буксируемые системы: Учебное пособие – Л.: Судосторение, 1981. – 304 с.

6. Пантов Е.Н. Основы теории движения подводных аппаратов / Пантов Е.Н., Махин Н.Н., Шереметов Б.Б. – Л.: Судостроение, 1973. – 209 с.

7. Киселев Л.В., Медведев А.В. Сравнительный анализ и оптимизация динамических свойств автономных подводных роботов различных проектов и конфигураций // Подводные исследования и робототехника. 2012. № 1 (13). С. 24-35.

МОБИЛЬНЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ МОРСКОЙ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ ПОЛИГОН ИПМТ ДВО РАН

Е.А. Купцов, Ю.В. Матвиенко

Институт проблем морских технологий ДВО РАН 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел./факс: (4232) 432416, e-mail: kea@marine.febras.ru

В докладе обсуждается опыт создания мобильного Испытательного морского метрологического полигона ИПМТ ДВО РАН для решения проблем метрологического обеспечения испытаний необитаемых подводных аппаратов (НПА) - автономных (АНПА) и телеуправляемых (ТНПА).

Введение

В течение нескольких лет в бухте Патрокл, г. Владивосток, ведутся натурные испытания различных НПА, в ходе которых разрабатываются отдельные элементы и технологии функционирования морского метрологического испытательного полигона (ИММП). ИММП представляет собой размещенную на берегу и на акватории систему средств измерений и вспомогательного обеспечивающего оборудования, объединенных общим требованием компактного и оперативного проведения следующих видов работ и испытаний:

•натурных морских испытаний, в том числе полигонных (по ГОСТ 16504-81), исследовательских (по ГОСТ 16504-81), государственных (приемочных, по ГОСТ РВ 15.211-2002), (Государственные и межведомственные испытания являются приемочными испытаниями в соответствии с ГОСТ 16504) предварительных (контрольных, по ГОСТ РВ 15.211-2002)), межведомственных (приемочных, по ГОСТ РВ 15.211-2002), аттестационных (по ГОСТ 16504-81) и сертификационных (по ГОСТ 16504-81) испытаний автономных и телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (АНПА, ТНПА);

• натурного исследования характеристик систем и их отдельных элементов в составе НПА и без НПА;

Предполагается, что при создании полигона будут разработаны методики выполнения типовых измерений, апробированы средства измерений и процедуры подготовки отчетных документов с выдачей необходимых отчетных документов - акта и отчета испытаний, протокола испытаний, сертификата соответствия или свидетельства об аттестации.

Для реализации проекта ИММП необходимо аттестовать в соответствии с требованиями действующих нормативных документов

1. Задачи и область применения

Задачи и область применения ИММП ИПМТ ДВО РАН – получение объективной информации о параметрах и характеристиках НПА и его систем, подвергаемых испытаниям, путем обеспечения единства и точности измерений, воспроизведения и поддержания с требуемой точностью заданных условий испытаний. Иначе - определение в нормируемых условиях с заданной точностью и достоверностью параметров, установленных в документации на НПА и его системы на различных стадиях жизненного цикла.

Мобильный ИММП также может использоваться в качестве базового для размещения подобных испытательных полигонов в местах постоянной дислокации (эксплуатации) НПА с целью периодического контроля их параметров и поверки систем.

Номенклатура и нормируемые параметры НПА и его составных частей, требования к погрешности их измерений, как правило, определяются техническим заданием на разработку

или техническими условиями на поставку НПА. В таблице 1 приведены основные параметры, определяющие конструктивные и эксплуатационные характеристики НПА. Эти параметры установлены на основании многолетнего опыта создания и эксплуатации в ИПМТ ДВО РАН различных АНПА [1,2].

Приведенный перечень параметров и погрешности их измерений охватывают все основные характеристики НПА.

Для обеспечения метрологической связи основных контролируемых параметров НПА и его составных частей по точности измерений с эталонами ведется разработка локальных поверочных схем для выделенных видов измерений.

Объекты испытаний Измеряемая величина		Диапазон	Погрешность
1	2	3	4
	Рабочая глубина, м	$0 \div 6000$	0.25%
АНПА	Дальность хода, км	до 300	
	Время автономной работы, час	до 100	5%
	Скорость хода, м/с	0 ÷ 3	0.02
Система энергообеспечения	Энергоемкость, кВт*час	до 30	
Индукционный компас	Угол курса, град	0 ÷ 360	0.5
Доплеровский лаг	Скорость движения, м/с	$0 \div 3$	0.02
Относительный лаг	Скорость движения, м/с	$0.5 \div 3$	10-20%
Эхолокационная система	Дальность обнаружения, м	до 70	1 %
Гидроакустическая навигационная система	Дальность действия в глубоком море, км	10	0,5%
Гидроакустическая система связи	Скорость односторонней передачи данных, бит/с	3000	
Телевизионная система	Дальность видения, м при разрешающей способности, мм	$0.7 Z_{\delta} 20$	
Низкочастотный	Разрешение по дальности	0.3	0.1
гидролокатор	(на дистанции 375 м), м	0,5	0,1
бокового обзора	Разрешение по углу град.	1,5	
Высокочастотный гидролокатор	Разрешение по дальности (на дистанции 80 м), м	0,05	0,02
бокового обзора	Разрешение по углу, град.	0,7	
Акустический профилограф	Разрешающая способность при определении глубины залегания осадочных слоев, м	0,5	1%
	Акустическое давление, создаваемое при излучении на расстоянии 1 м от антенны, не менее, Па	5000	15%
Электромагнитный искатель	Дальность действия, м	до 5	
Измеритель	Гидростатическое давление, в МПа	0 ÷ 60	± 0.07
параметров среды	Температура воды, в пределах, ⁰ С	$-2 \div +32$	± 0,05
	Удельная электропроводность, См/м	1 ÷ 6	0,04
	Скорость звука, м/с	$14\overline{00 \div 15}\overline{50}$	±0,2

Таблица 1. Номенклатура и нормируемые параметры НПА и его составных частей

2. Структура метрологического полигона ИМПТ ДВО РАН

Состав ИММП должен обеспечивать виды измерений по параметрам и характеристикам, представленным в таблице 1. Структура полигона представлена на рис. 1.

Размещение мобильного ИММП соответствует традиционным районам испытаний АНПА, разрабатываемых в ИПМТ ДВО РАН:

- бухта Троицы на юге Приморского края;

- бухта Патрокл в городе Владивостоке;

- акватория Амурского залива в районе Центра по производству, изготовлению и испытаниям автономных необитаемых аппаратов ИПМТ ДВО РАН.



Рис. 1 Структура Испытательного морского метрологического полигона ИПМТ

На начальном этапе реализации полигона были выполнены работы по прецизионной геодезической привязке отдельных береговых и донных точек в акватории размещения испытательного полигона. С этой целью лицензированной организацией (Отдел топографии "ЗАО ПИНИИ "Дальводпроект") были проведены инженерно – геодезические изыскания по планово – высотной привязке отдельных точек на берегу (BMF, DVB PIRS, VA, UM - береговые опорные геодезические пункты) и акватории (BA,BM, DD – поверхностные опорные пункты и донные опорные пункты) бухты Патрокл. Погрешность измерений пунктов не превышала 5 см. Точная координатная привязка донных точек в акватории фактически - одно из основных условий для проверки характеристик аппаратов по назначению дальности и разрешению при работе поисковых систем, а также измерения характеристик навигационных систем аппаратов. Все работы выполняются при постоянной работе гидроакустической навигационной системы с длинной базой с комплектом донных маяков-ответчиов, установленных в донных опорных пунктах.

Схема размещения полигона в б. Патрокл и различного оборудования на нем дана на рисунке 2.



Рис.2. Схема размещения полигона в б. Патрокл. BMF, DVB PIRS, VA, UM - береговые опорные геодезические пункты; BA,BM, DD – поверхностные опорные пункты и донные опорные пункты;. Фото – эталонные цели и маяки ответчики ГАНС 3 Эталонные цели ИММП

-	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		
	Наименование	Характеристики	Фотография
	Эталонный отражатель донный малый (БМ)	Ø=0,53 м, h=0,5м	
	Эталонный отражатель донный большой горизонтальный (ББГ)	Ø = 0,53м, h=2.2 м	21/10/2010 09:42
	Эталонный отражатель донный малый и большой вертикальный (БМБВ)	Ø=0,53 м, h=0,5м Ø = 0,53м, h=2.2 м, расстояние между отражателями = 1,5 м	
	Эталонный отражатель, сферопластик (МБС277) Эталонный отражатель, сферопластик (МБС197) Эталонный отражатель, сферопластик (МБС148) Эталонный отражатель, АМГ5 (МБА290) Эталонный отражатель, АМГ5 (МБА195) Эталонный отражатель, АМГ5 (МБА155)	$\emptyset = 277 \text{ MM}$ h = 114 MM $\emptyset = 197 \text{ MM}$ h = 122 MM $\emptyset = 148 \text{ MM}$ h = 121 MM $\emptyset = 290 \text{ MM}$ h = 100 MM $\emptyset = 195 \text{ MM}$ h = 120 MM $\emptyset = 155 \text{ MM}$ h = 120 MM	

Таблица 2. Эталонные цели ИММП ИПМТ ДВО РАН в б. Патрокл

Уголковые отражатели ма (УОМ)	алые h1 = 720 мм h2 = 850 мм	
Уголковые отражатели большие (УОБ)	Ø = 500 мм h1 = 2000 мм	
Набор малых уголковых отражателей	Ø = 150 мм Ø = 80 мм	
Эталонный протяженный металлический отражател (кабель - трос КГ 3)	Ю = 8 мм L = 70 м	
Телевизионная испытател таблица 0249	а = 1860 мм в = 1380 мм	

Лазерный тахеометр; <i>Trimble</i> 3303 DR	Точность измерения расстояний по призме ±(2 мм + 2 мм/км). Дальность измерения по 1 призме 3000 м. Точность угловых измерений 3".	
GPS/WAAS/EGNOS приемник Trimble 5700	Двухчастотный GPS и WAAS/EGNOS приемник с совмещенным УКВ радиомодемом	

На метрологическом полигоне ИМПТ ДВО РАН в б. Патрокл с 2006г. выполняются работы по предварительным и государственным испытаниям АНПА и ТНПА различных типов, разработанных и изготовленных в ИПМТ ДВО РАН.

Выводы

1. Испытания НПА и оценка их эффективности являются важной составной частью процесса развития технологий необитаемых подводных аппаратов. Комплекс проблем, связанных с испытаниями НПА (и связанных с этим измерений многих величин) становится все более острым, а оборудование, необходимое для обеспечения испытаний – все более сложными и дорогостоящими.

2. Необходимость в испытаниях НПА порождают много технологических проблем, связанных с комплексированием датчиков НПА, навигацией, связью и обработкой данных. Вот некоторые из них:

- проблема планирования испытаний в целом (т.е. их оптимизация), а также отельных, частных экспериментов (измерений), выработка критериев эффективности для всех этапов испытаний;

- проблема тестирования и калибровки многочисленных датчиков, основанных на различных физических принципах (это позволяет проверить и измерить наличие у них, требуемых свойств);

- объективные и точные измерения траектории движения НПА и их навигационная привязка с учетом относительного расположения находящихся поблизости объектов;

- измерение слабых физических полей (акустического, магнитного, и др.), свойственных НПА;

- сбор, хранение, обработка, обобщение, передача и анализ большого количества разнообразных данных, получаемых во время длительной миссии НПА (при использовании датчиков построенных на различных физических принципах);

- разработка и эксплуатация высокопроизводительных сетей связи (телеметрии), охватывающих большие водные пространства с целью обеспечения работы с большим количеством данными высокого класса точности, с реализацией соответствующих процедур контроля доступа и обеспечения режима секретности;

- реалистичная имитация сценариев действий для АНПА (навигация АНПА относительно цели и распознавания цели по характерным признакам);

- моделирование и имитация условий морской и атмосферной окружающей среды для планирования экспериментов, отработка бортовых систем управления АНПА при их функционировании в условиях слабоопределенной среды.

3. Создание и аттестация мобильного испытательного морского метрологического полигона является первым шагом необходимым для проведения приемо-сдаточных испытаний вновь создаваемых НПА и для сертификации и аттестации НПА в целом и его составных частей в процессе эксплуатации. Вопросы аттестации полигона для испытаний подводных аппаратов решаются во взаимодействии с ФГУП «ВНИИФТРИ», ФГУП «Приморское аэрогеодезическое предприятие», ЗАО НПП "НАВГЕОКОМ" другими организациями.

Литература

1. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под ред. Агеева М.Д. М.: Наука, 2005. 400 с.

2. Рылов Н.И., Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В. Ключевые проблемы технологии создания и практического использования автономных необитаемых подводных аппаратов. Научно – техническая конференция "Технические проблемы освоения мирового океана".Владивосток: Дальнаука, 2007. с.4-17.

О НЕКОТОРЫХ ВОПРОСАХ СЕРТИФИКАЦИИ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Д.Г. Ляхов

Институт проблем морских технологий ДВО РАН 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел./факс: (4232) 432416, e-mail: lyakhov@marine.febras.ru

Рассматривается вопрос сертификации необитаемых подводных аппаратов (НПА), а также определяющие для сертификационного процесса вопросы технического регулирования и стандартизации в области необитаемых подводных аппаратов. Что такое НПА в терминах действующего в РФ технического регулирования? Является ли НПА судном? Обязательна или нет сертификация НПА, что она может дать? Анализируются международные и национальные стандарты, правила классификационного общества Germanischer Lloyd (GL) и рекомендации саморегулируемой организации International Marine Contractors Association (IMCA). Рассматривается зарубежный опыт сертификации НПА, и степень готовности российских органов по сертификации продукции которую можно отнести к НПА

Сертификация и Техническое регулирование

Сертификация - форма осуществляемого органом по сертификации подтверждения соответствия объектов (сертификации) требованиям технических регламентов, положениям стандартов, сводов правил или условиям договоров, так определено в законе «О техническом регулировании» N 184-ФЗ, Ст. 2. На деле, конечно, это не абстрактная «форма», а вполне конкретная в каждом случае процедура, проходящая по инициативе заявителя на условиях договора между заявителем и органом по сертификации. Работы по таким договорам носят протяженный во времени и затратный по сути характер. Хозяйствующий субъект-заявитель (производитель или продавец) в сертификации участвует добровольно или вынужденно с целью получения сертификата – документа, который он обязан или считает необходимым предъявлять в обстоятельствах связанных с хозяйственной деятельностью, жизненными циклами выпускаемой продукции.

Определяющей частью процедуры является т.н. схема сертификации, в зависимости от вида продукции и особенностей производства, характеризующая необходимый уровень доказательности соответствия продукции установленным требованиям. Схемы сертификации приведены в ГОСТ Р 53603-2009, там же в п.4.3 устанавливается, что они должны быть известны заявителю до начала сертификации.

Очевидно, заявитель должен идентифицировать продукцию, предполагаемую к сертификации, по крайней мере, с целью определить под действие каких техрегламентов она подпадает и является ли ее сертификация обязательной.

В простейшем случае для этого имеется Единый перечень продукции, подлежащей обязательной сертификации - Постановление Правительства РФ от 01.12.2009 N 982, где перечислены соответствующие коды ОКП, однако на практике выявить исчерпывающий состав обязательных требований не просто. Например, вступление в силу технических регламентов Таможенного союза (ТР ТС) определяет новые требования к проведению подтверждения соответствия множества групп продукции, возникают и меняются соответствующие перечни. В любом случае, обязательном или добровольном, в заявке на сертификацию как правило необходимо указывать схему сертификации и те же сведения, которые рекомендуются ГОСТ Р 51293-99 для идентификации продукции (форма заключения).

Основной сферой коммерческого применения НПА является подводное строительство и связанные с этим инженерные изыскания в морской нефтегазодобывающей отрасли. В
безопасности и эффективности работы на шельфе прежде всего заинтересованы сами подрядчики. Поэтому стандартизация и нормотворчество в морском зарубежном нефтегазе происходили от «задачи» и предпринимательских интересов. Занялись этими вопросами сами подрядчики, объединившиеся в саморегулируемую организацию IMCA (The International Marine Contractors Association), которая со временем охватила многие ключевые вопросы коммерческой работы в море, от водолазного труда до работы судов с динамическим позиционированием.

В 1997 г. был выпущен первый свод правил для необитаемых аппаратов, с 2009 г. действует его третья редакция [1]. Работа автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) начала регламентироваться также с 2009 г. [2].

ІМСА не занимается сертификацией продукции и услуг в области НПА, и не выдает какие либо свидетельства персоналу – операторам НПА. Грубо говоря, цель ІМСА в том, чтобы подрядчики принимали к исполнению стандарты работ в море сбалансированные в смысле максимизация безопасности/ минимизация себестоимости и пользовались общими понятиями по оборудованию и правилами его эксплуатации на судах. Члены ІМСА, имеют огромный практический опыт, которым постоянно обмениваются и уделяют существенное внимание вопросам квалификации операторов НПА, т.к. персонал является неотъемлемой частью системы НПА, что неоднократно подчеркивается [3].

ISO Стандарт упоминающий ТПА в нефтегазовой отрасли вышел в 2002 г. [4]. Кроме того, существуют собственные отраслевые стандарты стран – активных разработчиков шельфа, например, норвежский NORSOK U-102 ROV services 2003 г. Определяющим фактором работы НПА в море является судно носитель, поэтому сертификационные общества также стали проявлять интерес в стандартизации и сертификации подводной техники. К примеру, АНПА REMUS 6000 и ТНПА КIEL 6000 института IFM Geomar прошли сертификацию Германишер Ллойд (GL). Правила (GL) для Unmanned Submersibles были введены в ноябре 2009 г.[5, 6].

Что такое АНПА?

Для научной работы – систематизации текстов отчетов и статей рубрикатор «ГРНТИ 28.23.27 – Интеллектуальные робототехнические системы» и классификатор «УДК 629.58 Подводные плавучие средства. Подводные аппараты. Подводные лодки» вполне хороши. На практике термин «необитаемый подводный аппарат» хоть и указывает на существенные признаки, все же не достаточен сам по себе для идентификации продукции машиностроения. Вместе с тем легко убедиться, что в существующем классификаторе ОКП (ОК-005) есть разные аппараты, но необитаемый подводный, к сожалению, не значится.

Следует признать, что многое по темам автоматики, электроники, робототехники от идей и до нюансов эксплуатации принадлежит западной научной и инженерной школе. Основная терминология и стандартизация в областях, где она существует и работает, изначально англоязычная [7,8]. Это нисколько не умаляет впечатляющих достижений отечественного научного и технологического сектора. Однако даже текущие разработки на шельфе РФ имеют интернациональный характер, а технические детали судоходства, судостроения и морской деятельности сначала формулируются in English, а затем гармонизируются.

В короткий период 1980–1991 гг., когда технологическое отставание было минимальным, были приняты русскоязычные аналоги западных стандартов касательно промышленных роботов и автоматизированных систем, и то, только потому, что в 1983–88 гг. в СССР было выпущено ~80 тыс. промышленных роботов. Термин «Робот» в РФ может значить: в общем случае АС [9], конкретнее только промышленные манипуляторы [10], а касательно аппаратов только краткое определение по ГОСТ [11]. И то определяется только «аппарат для подводных исследований» как «плавсредство, предназначенное для научных

исследований на различных глубинах и на дне моря», конкретизируя только, что они бывают необитаемые и самоходные.

В мире сейчас активно дискутируется вопрос статуса безэкипажных систем вообще, и морских в частности, который можно кратко сформулировать так: Это Судно или устройство?

В авиационной сфере, международная организация гражданской авиации циркуляром ICAO №328 (2011 г.) беспилотные летательные аппараты отнесла к воздушным судам.

Сейчас ICAO разрабатывает руководство, которое ожидается к концу 2013г. Позже будут подготовлены стандарты и правила. В июне рабочей группой выпущен Roadmap [12]. Весной 2014 г. ICAO планирует организовать всемирный симпозиум по Дистанционно Пилотируемым Авиационным Системам. По морской тематике весьма вероятно аналогичное развитие событий.

В рамках работы по созданию опытного образца АНПА «Клавесин», в ИПМТ, вопрос идентификации создаваемой продукции был решен отнесением изделия к продукции судостроения, а именно к категории «Суда морские научно-исследовательские, промышленно-хозяйственные, учебно-производственные и др. морские» с ОКП 74 1680.

Добровольной сертификацией НПА в РФ занимается РМРС. Федеральное автономное учреждение «Российский морской регистр судоходства» по уставу имеет целью своей деятельности: «...содействие обеспечению безопасности мореплавания судов и морских объектов...используемых в целях торгового мореплавания...» Предметом деятельности РМРС является выполнение работ «направленных» на это «содействие обеспечению».

На момент изучения вопроса, PMPC не публиковал правил для НПА, однако, можно предположить, что, гармонизация с правилами западных классификационных обществ будет иметь место, поэтому имеющиеся в открытом доступе правила Германишер Ллойд стоит рассмотреть подробнее.

Правила Германишер Ллойд для НПА

Для того чтобы начать сертификацию НПА в Германишер Ллойд необходимо представить на рассмотрение следующие документы (Табл. 1)

Фактически, выходит, что надо предоставить почти полный комплект КД, включая методики испытаний, данные о проделанных погружениях, анализ видов и последствий отказов и пр.

Ясно, что сертификация АНПА типа «Клавесин», разработанного установленным ГОСТ порядком возможна только на соответствие требованиям ТЗ (или их части). В общем случае ТЗ, как и прочие КД обладают как минимум свойствами интеллектуальной собственности. При применении порядка разработки по СРПП ВТ, вообще не любому органу по сертификации могут быть предоставлены сведения об изделии и характеристиках которым оно может или должно соответствовать. Таким образом, смысл подтверждения соответствия (сертификации) того, что соответствует ТЗ и так (по установленному порядку разработки) и больше ничему соответствовать не обязано – перестает быть очевидным, а польза и надобность сертификации - неясной.

Следует заметить, что любые органы по сертификации, прежде всего, заинтересованы в оказании возмездных услуг и расширении клиентуры. Если бы случаи сертификации НПА в GL, кроме двух упомянутых имели место, сообщения об этом были бы в медийном пространстве. Это означает, что аппаратам, имеющим, не менее широкое распространение, например РТПА Triton XLX и АНПА Kongsberg HUGIN сертификация не понадобилась.

Таблица 1. Перечень документов GL^1

N⁰	Наименование документа				
	На систему в целом/Total system				
1	A description of the submersible with details of its mode of operation, the proposed application and the essential design data including	Детальное описание ПА и способов его работы, функционального назначения и связанных с этим конструктивных особенностей			
2	General arrangement drawing and plans showing design details of the submersible, including specifications for materials, manufacture and testing.	Чертеж общего вида, сборочный чертеж, спецификация ПА, данные о применяемых комплектующих и материалах			
3	Drawings (block diagrams) of the total system.	Схема деления комплекса в целом			
4	Failure Modes and Effects Analysis (FMEA),	Анализ видов последствий и критичности отказов			
5	A comprehensive presentation of the measures taken to prevent corrosion.	Исчерпывающая информация о мерах предпринятых по защите от коррозии			
6	Stability documentation (according to aim of mission and design)	Расчет остойчивости			
7	Manual for operation and maintenance	Руководство по эксплуатации			
8	Operational records	Вахтенный журнал			
9	Trial program	Программа испытаний			
	На подсистемы/Support	ing structure and exostructure			
1	Drawings of the supporting and exostructure of the submersible are to be submitted with data concerning extensions like trimming weights, diving cells, pressure vessels, buoyancy elements, stabilizing fins, drives, umbilical connection, control box, search lights, ram protection, fairing, manipulators, fixing systems, instrument racks, etc.	Чертежи общего видаобеспечивающих и вспомогательных элементов. Включая: плавучести, балластировочные грузы, элементы крепления и развертывания/выборки, транспортировочное оборудование и т.д.			
2	Vessels and apparatus under pressure	Данные о сосудах и аппаратах, работающие под давлением			
3	Piping systems, umbilicals, and pumps	Схемы гидравлических, пневматических и пр. трубопроводов включая насосы. Кабельные сборки.			
4	Diving, compensation and trimming systems	Описание Системы балластировки			
5	Positioning system	Описание Системы позиционирования			
6	Working devices	Описание Рабочих органов (манипуляторы и пр.)			
7	Electrical equipment	Описание Электротехнического оборудования			
8	Automation, navigation and locating systems	Описание Систем автоматизации, навигации и определения местоположения			
9	Fire and explosion protection	Описание мер по Пожаро- и Взрывобезопасности			
10	Launcher	Описание спуско-подьемного устройства			

¹ Перевод дан только для иллюстрации

Заключение

Относительно стройная и продуманная СРПП ГОСТ РВ существует только для ВТ с встроенными ограничениями по применимости и пользе в конечном итоге. Вопросы идентификации и оценки соответствия продукции решаемы, но труднопереносимы в гражданскую область.

Автору не удалось выяснить, существуют ли в настоящее время субъекты надзорных отношений, в которых объектом выступает НПА как изделие производственно технического назначения.

НПА не вполне можно относить к судам, т.к. аппараты не используются для целей торгового мореплавания в первоначальном смысле Hague rules, т.е. не перевозят коммерческих грузов, пассажиров и багажа. Возможно, морское право в случае НПА должно распространяться на судно-носитель и операторов (аналогично pilot of civil unmanned aircraft systems) как дистанционным пилотам, тем более что практически все известные НПА работают в супервизорном режиме.

В общем случае, НПА – это комплекс, который содержит хотя бы одно безэкипажное плавсредство, с необходимостью требует для работы хотя бы одного оператора и может выполнить хоть одну задачу по назначению, связанную с движением плавсредства в воде. В подавляющем большинстве случаев НПА используется совместно с судном носителем.

Сертификация в некоторых случаях носит характер навязанной услуги или ведомственной ренты. Правила сертификации НПА сформулированы GL, но широкого распространения не имеют. Сертификация операторов и техников обучающими центрами, которые аккредитованы IMCA, напротив, является практически обязательным условием контракта на подводные работы с участием НПА.

Литература

1. IMCA R 004. Code of practice for the safe and efficient operation of remotely operated vehicles. Rev. 3, 2009.

2. IMCA S 011. The Safe Operation of Autonomous Underwater Vehicles (AUVs). 2009.

3. Ляхов Д.Г., Мун С.А. Вопросы подготовки операторов необитаемых подводных аппаратов. // Материалы Четвертой Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана» (ТПОМО-4). Владивосток: ИПМТ. 2011. С.128-132.

4. ISO 13628-8:2002. Petroleum and natural gas industries. Design and operation of subsea production systems. Part 8: Remotely Operated Vehicle (ROV) interfaces on subsea production systems.

5. Germanischer Lloyd's "Rules for Classification and Construction" – I Ship Technology – 5 Underwater Technology – 3 Unmanned Submersibles (ROV, AUV) and Underwater Working Machines 2009

6. Stephan Hinz, Karsten D. Hagenah, Harald Pauli Certification of Unmanned Underwater Vehicles and Working Machines - Safety and Reliability under Deep-Sea and Offshore Conditions, 8th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Rostock, Germany 15 - 17 September 2010.

7. Мюллер Ф. Телеуправление. Систематический обзор методов и установок телеуправления. М. Иностранная литература 1957г. 312с (Ferdinand Muller, Leitfaden der fernlenkung: Eine systematische Zusammenstellung der Verfahren und Anlagen der Fernlenkung, 1955) (Перевод с немецкого Е.А.Румянцева, А.А.Малевича, А.Е.Акиндеева под редакцией профессора А.А.Красовского.)

8. Калман Р. Об общей теории систем управления//Труды 1-го конгресса ИФАК. М: Изво АНСССР. 1961г., Т.2.521-547. (On the general theory of control systems, in Proceeding first IFAC Congress on Automatic Control, Moscow, 1960; Butterworths, London, 1961, Vol. 1, pp.481-492.

9. ГОСТ 34.003-90 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Термины и определения.

10. ГОСТ 25686-85 Манипуляторы, автооператоры и промышленные роботы. Термины и определения

11. ГОСТ 18458-84 Приборы, оборудование и плавсредства наблюдений в морях и океанах. Термины и определения

12. Roadmap for the integration of civil Remotely-Piloted Aircraft Systems into the European Aviation System/European RPAS Steering Group report/June 2013

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМУ ЦЕНТРУ «ПОДВОДНАЯ РОБОТОТЕХНИКА» ДВФУ И ИПМТ ДВО РАН – ПЯТЬ ЛЕТ: НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ РАБОТЫ

С.А. Мун, А.Ф. Щербатюк

НОЦ «Подводная робототехника» ДВФУ и ИПМТ ДВО РАН, 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел /факс: (423) 2432416 e-mail: scherba@marine.febras.ru

В докладе сообщается о некоторых выполненных в период 2009 – 2013г. в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры России» государственных контрактах. Кратко рассмотрены некоторые итоги выступления на молодежных чемпионатах мира по подводной робототехнике студенческой команды ДВФУ, подготовленной на базе НОЦ ПР. Сообщается о том, что команда дважды в 2010 и 2012 годах занимала 1 место в классе управляемых по кабелю подводных аппаратов, а в 2013 году выиграла международные соревнования AUV Challenge 2013 по автономным подводным аппаратам, которые проходили в национальном университете Сингапура.

Научно образовательный центр «Подводная робототехника» /НОЦ ПР/ был образован в марте 2008 года на основе договора о сотрудничестве между ДВГУ и ИПМТ ДВО РАН. В связи с образованием ДВФУ в 2011 г. НОЦ ПР был воссоздан на основе ДВФУ и ИПМТ ДВО РАН. ДВО РАН.

Основными задачами НОЦ ПР являются:

- выполнение работ по созданию и применению подводной робототехники на современном мировом уровне в рамках государственных контрактов и грантов;

- привлечение талантливых студентов к выполнению научно-исследовательских работ, а также для представления ДВФУ и ДВО РАН на международных молодежных соревнованиях по подводной робототехнике;

- подготовка специалистов высшей квалификации в области подводной робототехники.

Некоторые проекты НОЦ ПР

В период 2009 – 2011г. в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры России» выполнен государственный контракт на тему: «Разработка многофункционального малогабаритного необитаемого подводного аппарата» в котором был разработан малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат /АНПА/ МАРК [1] (рис. 1) (вес - 50 кг, поперечный диаметр - 200 мм, длина - 1800 мм, предельная рабочая глубина - 200 м, максимальная скорость движения - 2 м/с и продолжительность непрерывной работы - 10 часов). АНПА данного класса являются самыми распространенными в мире. Наиболее известными среди них являются REMUS100 (HYDROID, CША), GAVIA (Hafmynd, Исландия) и Iver2 (OceanServer, США). МАРК по основным характеристикам не уступает им, а по маневренности превосходит их за счет более развитого движительного комплекса, что при решении некоторых задач является важным.

Для аппарата созданы системы программного управления и навигации нового поколения, которые обеспечивают его работу в составе группы подводных аппаратов. Основу цифровой системы программного управления /СПУ/ АНПА составляет локальная вычислительная сеть /ЛВС/ с программным обеспечением. Система программного управления предназначена для выполнения программы-задания (миссии) аппарата, управления всеми системами аппарата во всех режимах, загрузки миссии аппарата и ее тестирования перед запуском, обеспечения информационного обмена с постом оператора и другими подводными аппаратами, контроля состояния (диагностики) систем аппарата в

процессе выполнения миссии, обеспечения считывания накопленной информации после всплытия АНПА на поверхность или после подъема на борт обеспечивающего судна.

Структура СПУ состоит из постоянной и переменной частей. Постоянная часть включает программу "менеджер миссии", программу управления движением, навигационную программу, бортовой архиватор данных и программу диагностики АНПА. Переменная часть представляет собой программу-задание (миссию) для текущего запуска. Для управления устройствами АНПА используется набор управляющих программ – драйверов. Драйвер осуществляет связь с устройством посредством последовательного протокола через RS или USB порты.

Для передачи сообщений, как между параллельно работающими процессами, реализующими указанные выше программные модули, так и для связи между АНПА и с постом оператора, используется механизм IPC [2]. С его помощью осуществляется обмен по принципу «публикатор-подписчик». Каждый процесс имеет возможность публиковать в системе пакеты с данными, а также подписываться на получение интересующих сообщений и использовать содержащиеся в них данные. Предусмотрена ситуация, когда одному аппарату может полностью передаваться управление другим АНПА, вплоть до формирования упоров на его движители. Для обмена сообщениями между подводными аппаратами и с постом оператора используются системы радио (на поверхности) и гидроакустической связи. Драйвер модема, получив локальное IPC-сообщение для отправки на другой узел, формирует на его основе байтовый поток и осуществляет его передачу. На принимающей стороне драйвер модема из получаемого потока байтов формирует исходное IPC-сообщение и публикует его в своей сети. Все программное обеспечение работает под управлением OC Linux.



Рис.1. АНПА МАРК на научно-исследовательском судне «Юрий Молоков», во время морских испытаний.

При разработке АНПА МАРК одной из основных целей было обеспечение высокой мобильности подводного робототехнического комплекса в целом, включая организацию навигационного обеспечения. Развертывание традиционной гидроакустической навигационной системы с длинной базой /ГАНС ДБ/ предполагает установку и координирование маяков-ответчиков /МО/ перед началом работы. После окончания работ требуется выполнить их подъем. Данные операции могут занять до нескольких суток и при этом имеется вероятность утраты МО. Кроме того, дальность действия такой системы обычно не превышает 10 км. При обследовании больших площадей возникает

необходимость в многократной переустановке системы, что существенно увеличивает время и стоимость выполнения работ.

С целью создания мобильного навигационного комплекса, для АНПА разработана синхронная гидроакустическая навигационная система с синтезированной длинной базой /ГАНС СДБ/ [3], использующая в качестве единственного навигационного маяка мобильную гидроакустическую антенну /МГА/, буксируемую автономным необитаемым водным аппаратом /АНВА/. Работа данной НС основана на использовании модемной акустической связи, которая позволяет синхронно обмениваться пакетами навигационных данных между АНПА и АНВА и одновременно измерять время распространения акустического сигнала между ними. В процессе выполнения задания АНПА и АНВА поочередно обмениваются навигационными данными, на основе которых АНПА определяет свое местоположение, а АНВА отслеживает траекторию движения АНПА. Информационная посылка от АНВА содержит координаты МГА, рассчитанные с использованием данных от GPS.

Навигационная программа рассчитывает координаты АНПА на основе обработки данных от нескольких устройств: GPS (на поверхности), инерциального измерительного модуля, доплеровского лага и гидроакустической навигационной системы. На основе полученной в течение нескольких тактов работы ГАНС СДБ информации о положении МГА и измеренных дальностях между АНПА и МГА, на борту подводного аппарата рассчитываются его координаты. Полученное местоположение вместе с измерениями скорости, курса и глубины движения АНПА передаются им на АНВА в ответной информационной посылке. Рассмотренная синхронная гидроакустическая навигационная система одновременно обеспечивает навигацию нескольких АНПА в одной акустической сети. При этом каждый подводный аппарат не только определяет свое местоположение, но и имеет возможность отслеживать положение других аппаратов в рабочей области.

В рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры России» выполняется государственный контракт (2012 – 2013 г.) на тему: «Разработка интеллектуального автономного необитаемого транспортного комплекса, включающего поверхностный и подводный роботы, предназначенного для решения широкого круга задач освоения и исследования Мирового океана». Данный проект предусматривает разработку малогабаритного АНВА (рис. 2), предназначенного для работы в комплексе с АНПА МАРК [4].

Указанный комплекс предназначен для работы в автоматическом режиме в соответствии с введенной перед его запуском программой-заданием (миссией). АНВА и АНПА объединены единой распределенной интеллектуальной системой управления и навигации. Если в процессе работы возникнет необходимость, то оператор имеет возможность перевести комплекс на ручное управление и в телеуправляемом режиме



а). б). Рис. 2. АНВА, входящий в разработанный морской робототехнический комплекс.

выполнить, например, детальный видео осмотр обнаруженных объектов. Режимы автоматического и супервизорного управления могут произвольно чередоваться по командам оператора в зависимости от характера текущих работ, выполняемых комплексом. АНВА должен двигаться по специальным траекториям на поверхности водной среды в зависимости от решаемых задач и текущего местоположения АНПА. Задачами АНВА являются организация навигационной поддержки работы АНПА и обеспечение связи между АНПА и наземным пунктом управления. Местоположение АНВА определяется на основе установленного на него приемника GPS или ГЛОНАСС.

За пять лет в рамках НОЦ ПР разработаны два АНПА и три ТНПА. Получены один патент на изобретение и два патента на программы. Через команду прошло более 20 студентов. Подготовлено три и из них защищено две кандидатские диссертации. Приняты на работу в ИПМТ ДВО РАН - 5 человек и в ДВФУ – 6 человек.

Участие в студенческих соревнования по ПР

Важной задачей, связанной с развитием робототехники в целом, является привлечение талантливой молодежи в данную область знаний. Один из эффективных путей популяризации этого направления основан на проведении национальных и международных молодежных соревнований в разных классах мобильных роботов. Целями соревнований являются обеспечение возможностей для талантливой молодежи проявить себя, а для профессионалов - оценить и обратить на нее внимание. В настоящее время существует множество соревнований в области наземной (Intelligent Ground Vehicle /IGV/), воздушной (Unmanned Aerial Systems /UAS/ и International Aerial Robotic Competition), водной (RoboBoat Competition) и подводной (SeaPerch, RoboSub и ROV Competition) робототехники. Все эти соревнования проводятся под эгидой AUVSI (Association for Unmanned Vehicle Systems International), за исключением соревнований в классе телеуправляемых подводных аппаратов International ROV Competition, которые проводятся под эгидой MATE (Marine Advanced Technology Education). Некоторые соревнования предназначены только для школьников, например, SeaPerch. В большинстве соревнований могут принимать участие учащиеся колледжей, университетов и академий, а в некоторых соревнованиях в команды могут входить аспиранты и молодые специалисты – ROBOSUB. Профессионалы от индустрии, бизнеса, правительственных агентств и научных организаций оказывают содействие в проведении международных студенческих соревнований посредством спонсирования, предоставления необходимого оборудования, а также добровольного участия в качестве технических советников и судей.

Задания для студенческих подводных аппаратов на RoboSub и ROV Competition посвящены актуальным современным проблемам. Например, в 2009 году целью заданий для ROV было спасение потерпевших аварию подводных лодок, в 2010 году - обследование подводных вулканов, в 2011 году - выполнение спасательных операций после аварии на нефтяной платформе, а в 2012 году – обследование затонувших судов и удаление остатков топлива из топливных цистерн. В финальных соревнованиях принимают участие команды ведущих университетов мира, специализирующиеся в данной области (как правило, 26-28 команд). Среди них - Массачусетский технологический институт, Вашингтонский университет, университет Калифорнии и пр.

С 2008 года в соревнованиях в классе ROV принимает участие студенческая команда ДВФУ, подготовленная на базе НОЦ «Подводная робототехника» с привлечением специалистов ИМПТ ДВО РАН и ДВФУ. Дважды в 2010 и 2012 годах она побеждала в студенческих чемпионатах мира в классе ROV. В 2012 году команда впервые приняла участие в соревновании ROBOSUB по автономным подводным аппаратам, которые в том году были уже пятнадцатыми с начала их организации. В данном чемпионате приняли участие 28 команд из 11 стран, в том числе 16 команд из США, 2 команды из Канады, а также команды из Японии, России, Китая, Испании, Швеции и т.д.

Первое и второе места завоевали команды корнельского и флоридского университетов, на третьем месте была команда Sonia из Канады – все эти команды уже многократно участвовали в данных соревнованиях и в разное время становились чемпионами. Наша команда в итоге заняла пятое место и получила приз «За блестящий дебют». В 2013 году в марте наша команда участвовала в международных соревнованиях AUV Challenge 2013 по автономным подводным аппаратам, которые проходили в национальном университете Сингапура, и завоевала 1 место (рис. 3).



Рис. 3. Победа в международных соревнованиях AUV Challenge 2013 по автономным подводным аппаратам.

Литература

1. Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С, Кушнерик А.А., Туфанов И.Е., Щербатюк А.Ф. Малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат МАРК нового поколения для выполнения групповых операций. // Мехатроника, автоматизация, управление, Москва, №6, 2012, с. 59-65.

2. http://www.cs.cmu.edu/~ipc/

3. Щербатюк А.Ф., Дубровин Ф.С. Алгоритмы определения местоположения АНПА на основе информации о дальности до одного мобильного гидроакустического маяка. // Информационно-измерительные и управляющие системы. Москва, №9, 2012, с. 26-39.

4. Гой В.А., Дубровин Ф.С., Кушнерик А.А., Михайлов Д.Н., Сергеенко Н.С., Туфанов И.Е., Щербатюк А.Ф. Разработка морского интеллектуального робототехнического комплекса, включающего АНПА и АНВА. // Материалы докладов V Всероссийской науч.-техн. конференции "Технические проблемы освоения Мирового океана". Владивосток: Дальнаука. 2013.

РАЗРАБОТКА МОРСКОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА, ВКЛЮЧАЮЩЕГО АНПА И АНВА

В.А. Гой, Ф.С. Дубровин, А.А. Кушнерик, Д.Н. Михайлов, Н.С. Сергеенко, И.Е. Туфанов, А.Ф. Щербатюк

НОЦ «Подводная робототехника» ДВФУ и ИПМТ ДВО РАН, 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел /факс: (423) 2432416 e-mail: scherba@marine.febras.ru

В статье рассмотрены состав и структура комплекса, включающего автономные необитаемые подводный и водный (движущийся по водной поверхности) аппараты, а также алгоритм формирования траектории движения автономного необитаемого водного аппарата относительно автономного необитаемого подводного аппарата.

Создание комплексов автономных необитаемых подводного и водного (движущегося по водной поверхности) аппаратов (АНПА и АНВА), наделенных элементами искусственного интеллекта, для выполнения различных подводно-технических работ, в настоящее время во всем мире признано важным и актуальным. Возможность автономной эксплуатации комплекса указанных аппаратов без непосредственного присутствия человека в районе работ позволит отказаться от использования судов и существенно снизит стоимость выполнения морских работ. Работы по созданию комплексов автономных необитаемых подводного и водного аппаратов интенсивно ведутся за рубежом. В частности, в Массачусетском технологическом институте подобный комплекс разрабатывается на основе АНПА Bluefin и автономного каяка, оснащенного необходимым оборудованием для связи и навигации. В Лиссабонском техническом институте подобный комплекс предполагается создать на базе АНВА ROAZ и АНПА MARES. Близкие работы ведутся и в ряде других



Рис. 1. Морской интеллектуальный робототехнический комплекс, включающий АНПА И АНВА.

мировых центров подводной робототехники (MBARI /USA/, WHOI /USA/, IFREMER /FRANCE/, ATLAS /GERMANY/ и др.).

Основными задачами АНВА в данном комплексе являются навигационное обеспечение работы АНПА и организация связи между АНПА и наземным пунктом управления (рис. 1).

Основные области использования комплекса АНПА и АНВА:

картографирование дна;

поиск затонувших объектов;

обследование протяженных объектов (подводных трубопроводов и кабелей); экологический мониторинг;

оценка запасов биоресурсов.

В данной статье описан морской робототехнический комплекс, разработанный в рамках Государственного контракта 14.A18.21.0283 при поддержке гранта РФФИ 130800967a научнов образовательном центре /НОЦ/ «Подводная робототехника»,

образованном на основе ДВФУ и ИПМТ ДВО РАН. В части 1 рассмотрены состав и структура комплекса, в части 2 описан алгоритм формирования траектории движения АНВА относительно АНПА и в части 3 приведено краткое описание АНПА и АНВА, входящих в разрабатываемый комплекс.

1. Состав и структура морского интеллектуального робототехнического комплекса

Указанный комплекс предназначен для работы в автоматическом режиме в соответствии с введенной перед его запуском программой-заданием (миссией). АНВА и АНПА объединены единой распределенной интеллектуальной системой управления и навигации (рис.2). Если в процессе работы возникнет необходимость, то оператор имеет возможность перевести комплекс на ручное управление и в телеуправляемом режиме выполнить, например, детальный видео осмотр обнаруженных объектов. Режимы автоматического и супервизорного управления могут произвольно чередоваться по командам оператора в зависимости от характера текущих работ, выполняемых комплексом. АНВА должен двигаться по специальным траекториям на поверхности водной среды в зависимости от решаемых задач и текущего местоположения АНПА. Задачами АНВА являются организация навигационной поддержки работы АНПА и обеспечение связи между АНПА и наземным пунктом управления. Местоположение АНВА определяется на основе установленного на него приемника GPS или ГЛОНАСС.



Рис. 2. Структурная схема робототехнического комплекса, включающего АНПА И АНВА.

Для организации навигационной поддержки работы АНПА, разработана гидроакустическая навигационная система с синтезированной длинной базой / СДБ ГАНС/. Данная система использует один мобильный гидроакустический маяк, расположенный на АНВА. Работа данной навигационной системы основана на использовании модемной акустической связи, которая позволит синхронно обмениваться пакетами навигационных данных между АНПА и АНВА и одновременно измерять время распространения акустического сигнала между ними. В процессе выполнения задания АНПА и АНВА поочередно обмениваются навигационными данными, на основе которых АНПА определяет

свое местоположение, а АНВА отслеживает траекторию движения АНПА. Информационная посылка от АНВА содержит координаты маяка, рассчитанные с использованием данных от GPS. На основе полученной в течение нескольких тактов работы СДБ ГАНС информации о положении маяка и измеренных дальностях между АНПА и маяком, на борту подводного аппарата рассчитываются его координаты. Полученное местоположение вместе с измерениями скорости, курса и глубины движения АНПА передаются им на АНВА в ответной информационной посылке.

Канал связи АНПА с наземным пунктом управления состоит из двух частей – акустического канала связи (для обеспечения обмена сообщениями между АНПА и АНВА) и радиоканала связи (для обеспечения обмена сообщениями АНВА с постом оператора).

2. Алгоритм формирования траектории движения АНВА

Рассмотрим два положения АНПА и мобильного маяка (рис. 3), соответствующие двум последовательным тактам работы ГАНС, где Р $(x_A, y_A)_1$ и Р $(x_A, y_A)_2$ – положения АНПА, К $(x_M, y_M)_1$ и К $(x_M, y_M)_2$ – положения буксируемого маяка. После коррекции местоположения АНПА на основе информации о дальности R_1 до навигационного маяка круг начальных погрешностей будет сжат в эллипс с радиально направленной малой осью. На рисунке 3 для положения 1 показаны начальная круговая область ошибки и эллиптическая область ошибки, полученная в результате коррекции местоположении АНПА на основе информации о дальности R_1 .

Для обеспечения высокой точности навигации АНПА мобильному маяку на каждом такте работы ГАНС следует находиться в такой позиции, которая бы позволяла значительно уменьшить эллипс неопределенности. Максимальному уменьшению области неопределенности соответствует такой алгоритм формирования траектории движения мобильного маяка, при котором в каждый момент излучения навигационного сигнала он находится на большой оси эллипса ошибок. Начальный эллипс ошибок и скорректированный эллипс ошибок, полученный на основе информации о дальности R_2 также показаны на рисунке 3.

Для реализации данного алгоритма автономный необитаемый водный аппарат, буксирующий мобильный маяк, периодически по гидроакустическому каналу связи должен получать от АНПА пакет данных, включающий оценку его координат, и числа, описывающие ковариационную матрицу ошибок координат, а также текущие курс и скорость движения АНПА. На основе этих данных можно оценить местоположение АНПА в момент времени $t_k + \Delta t$.



Рис. 3. Изменение эллипса ошибок при движении навигационного маяка вокруг АНПА.

Элементы ковариационной матрицы p_{xk} , p_{yk} и p_{xyk} позволяют определить ориентацию эллипса неопределенности и вычислить угол ψ_k между его большой осью и осью Ox:

$$\psi_{k} = \begin{cases} \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2p_{xyk}}{p_{xk} - p_{yk}}, & e c \pi p_{xk} > p_{yk}, \\ \\ \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2p_{xyk}}{p_{xk} - p_{yk}}, & e c \pi p_{xk} < p_{yk}, \end{cases}$$

где в случае, когда $p_{xk} \approx p_{yk}$, угол ψ_k принимается равным $\pm \pi/4$ (в зависимости от знака p_{xyk}).

Используя оценку местоположения АНПА $\tilde{X}(t_k + \Delta t)$ и найденный угол ψ_k можно определить на плоскости *Оху* прямую ℓ , находясь на которой мобильный маяк позволит выполнить эффективное сжатие эллипса неопределенности местонахождения АНПА.

3. Краткое описание АНПА и АНВА

АНПА, входящий в данный комплекс (рис. 4a), был разработан в 2011 году [1] в научно-образовательном центре «Подводная робототехника» ДВФУ и ИПМТ ДВО РАН. Для аппарата созданы системы программного управления и навигации нового поколения, которые обеспечивают его работу в составе группы подводных аппаратов. Данный подводный аппарат имеет вес около 50 кг и предназначен для решения широкого круга задач на глубинах до 200 метров.

Первый этап морских испытаний АНПА МАРК был выполнен в августе 2011 года в заливе Петра Великого Японского моря. В испытаниях принимало участие малое научноисследовательское судно /НИС/ «Юрий Молоков» (рис. 4б). На данном этапе были уточнены некоторые динамические характеристики аппарата и исследована работоспособность системы программного управления АНПА.

АНВА представляет собой движущийся по поверхности автономный аппарат катамаранного типа (рис. 5а, б). В его состав входят поплавки, обеспечивающие необходимую плавучесть комплекса. Поплавки устанавливаются на рамную конструкцию, собранную из алюминиевых труб диаметром 40 мм. К раме крепятся радио и GPS антенны,



Рис. 4. АНПА, входящий в разработанный морской робототехнический комплекс (a) и момент морских испытаний АНПА в заливе Петра Великого (б).

a)

б)



а) б)
 Рис. 5. АНВА, входящий в разработанный морской робототехнический комплекс.

панели солнечных батарей и прочее оборудование (устройство стыковки, дополнительные датчики). В поплавках носителя встроены отсеки для блоков электроники и аккумуляторных батарей. Поплавки АНВА изготовлены из вспененного пенополистирола плотностью 20 кг/м³. Один бортовой поплавок имеет положительную плавучесть около 80 кг. Масса АНВА составляет около 55 кг.

ДРК АНВА включает два маршевых движителя «Torqeedo Ultralight», которые устанавливаются в кормовой части носителя на поплавки. Каждый движитель имеет свой электронный блок управления. В движителях Torqeedo используются электромоторы бесколлекторного типа, что обеспечивает их высокую мощность и надежность. Каждый движитель имеет индивидуальную аккумуляторную батарею, которая подзаряжается от солнечных панелей. Это позволяет в светлое время суток существенно увеличить автономность АНВА.

Литература

1. Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С, Кушнерик А.А., Туфанов И.Е., Щербатюк А.Ф. Малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат МАРК нового поколения для выполнения групповых операций. // Мехатроника, автоматизация, управление, Москва, №6, 2012, с. 59-65.

2. Щербатюк А.Ф., Дубровин Ф.С. Алгоритмы определения местоположения АНПА на основе информации о дальности до одного мобильного гидроакустического маяка. // Информационно-измерительные и управляющие системы. Москва, №9, 2012, с. 26-39.

МОДЕЛЬ УЧЁТА ВЛИЯНИЯ ТЕЧЕНИЯ НА КООРДИНИРОВАНИЕ АНПА НА МАРШРУТЕ ПЕРЕХОДА В ЗАДАННЫЙ РАЙОН

И.В. Капустин, А.С. Проценюк (ГУГИ МО РФ)

В докладе рассматривается один из возможных подходов к решению задачи учёта влияния течения на координирование АНПА на маршруте перехода в заданный район с расчётом вероятности попадания в заданный район.

В реальных условиях на эффективность использования АНПА существенное влияние могут оказывать течения. В этих условиях большую значимость приобретает задача учёта влияния течения на точность координирования АНПА при переходе аппарата от точки пуска до района решения поставленных задач, например, съёмки полей природной среды в особо важных районов Мирового океана и, прежде всего, в условиях отсутствия на маршруте и в районе съёмки специальных средств коррекции, например, донных маяков-ответчиков.

В связи с вышеуказанным, в ходе натурных испытаний опытных образцов рассматриваемых подводных аппаратов целесообразно исследовать особенности влияния течения на координирование АНПА.

Один из возможных подходов к решению указанной задачи дается ниже.

Оценить среднюю квадратическую погрешность счисления пути (M_{cq}) АНПА можно по формуле [1]:

$$M_{cu} = t \sqrt{\left(v_a \frac{m_k}{57.3}\right)^2 + \left(v_a \frac{m_v}{100}\right)^2},$$
 (1)

где: *v*_{*a*} – скорость хода АНПА (уз);

 m_k – СКП определения курса АНПА (град.);

*m*_v – СКП измерения скорости хода АНПА (%).

t – время нахождения АНПА на маршруте перехода.

Одним из недостатков формулы (1) является неучёт фактора влияния течения на СКП счисления пути движущегося объекта (АНПА).

Следует отметить, что морские течения имеют значительную изменчивость во времени и пространстве. Наблюдения за течениями выявили две основные составляющие случайной функции скорости течения V(t): низкочастотную (долгопериодную) $v_{H}(t)$ и высокочастотную (короткопериодную) $v_{\theta}(t)$ [1].

Период изменения скорости течения может изменяться от нескольких часов (высокочастотная составляющая) до нескольких десятков суток, а в ряде случаев – и несколько месяцев (для низкочастотной составляющей). Первый случай наиболее характерен, например, для центральной части Арктического региона с устойчивым паковым льдом, а второй – для окраинных морей Северного Ледовитого океана.

В условиях наличия высокочастотной составляющей $v_{e}(t)$ время действия АПНА может быть соизмеримо с периодом изменения скорости течения и, следовательно, скорость течения может считаться постоянным. В этом случае, как показано в [2], изменчивость постоянного течения характеризуется осредненной дисперсией $\sigma_n^2 = 0.06 y3^2$.

Наибольший интерес представляет оценка влияния низкочастотной составляющей течения (переменного течения) на СКП счисления пути АНПА.

Автокорреляционная функция переменного течения описывается одним из следующих выражений:

$$k_{c_1}(\tau) = \sigma^2 \cdot e^{-\alpha(\tau)}; \tag{2}$$

$$k_{c_2}(\tau) = \sigma^2 \cdot e^{-\alpha(\tau)} \cdot \cos\beta(\tau); \tag{3}$$

$$k_{c_3}(\tau) = \sigma^2 \cdot e^{-\alpha(\tau)} \left(\cos\beta(\tau) + \frac{\alpha}{\beta} \cdot \sin\beta(\tau) \right).$$
(4)

Параметры σ^2 , α и β в указанных выражениях имеют значения, показанные в табл. 1 [3]:

Таблица 1. Числовые характеристики параметров σ^2 , α и β	
--	--

Вид функции	Параметры, ед. измерения				
(Номер формулы)	σ^2, y_3^2	<i>α</i> , ч ⁻¹	<i>β</i> , ч ⁻¹		
2	0,2-0,5	0,2-0,4	-		
3	0,25-0,5	0,06-0,1	0,2-0,4		
4	0,01-0,25	0,1-0,6	0,3-0,7		

Изменение скорости хода АНПА под воздействием переменного течения будет происходить случайным образом. Случайные и не учитываемые колебания скорости хода АНПА, обусловленные воздействием переменного течения, вызывают накапливающуюся во времени случайную погрешность счисления $\Delta c(t)$:

$$\Delta c(t) = \int_{0}^{t} v(t) dt.$$
⁽⁵⁾

Случайная функция скорости течения на ограниченном интервале времени может быть принята за стационарную. Тогда дисперсия стационарной случайной функции будет иметь следующий вид:

$$D_c(t) = 2 \int_0^t (t - \tau) k(\tau) dt.$$
⁽⁶⁾

Вычисление интеграла (6) последовательно для каждой функции (2)-(4), позволяет получить: а) для функции (2):

$$D_{c_1}(t) = \frac{2\sigma^2 \left[\alpha t - \left(e^{-\alpha t} - 1\right)\right]}{\alpha^2},\tag{7}$$

б) для функции (3):

$$D_{c_2}(t) = \frac{2\alpha^2}{\alpha^2 + \beta^2} \left\{ \alpha t + \frac{\beta^2 - \alpha^2}{\alpha^2 + \beta^2} + \frac{e^{-\alpha t}}{\alpha^2 + \beta^2} \left[(\alpha^2 - \beta^2) \cos\beta t - 2\alpha\beta \sin\beta t \right] \right\},$$
(8)

в) для функции (4):

$$D_{c_3}(t) = \frac{2\alpha^2}{\alpha^2 + \beta^2} \left[2\alpha t + \frac{\beta^2 - 3\alpha^2}{\alpha^2 + \beta^2} + \frac{3\alpha^2 - \beta^2}{\alpha^2 + \beta^2} e^{-\alpha t} \cos\beta t + \frac{\alpha(\alpha^2 - 3\beta^2)}{\beta(\alpha^2 + \beta^2)} e^{-\alpha t} \sin\beta t \right].$$
(9)

При малых значениях $t < \frac{\tau_0}{4} \approx 2 \eta$ (здесь τ_0 – интервал корреляции) формулы (7) - (9) дают примерно одинаковый результат.

Учитывая, что при $t < 2 \, u$ величина $\alpha < 0.4$, произведение $\alpha \cdot t < 1$. Поэтому функцию е^{- αt} в формуле (7) можно разложить в ряд:

$$e^{-\alpha t} = 1 - \alpha t + \frac{\alpha^2 t^2}{2} + \cdots$$
 (10)

После этого формула (7) примет вид: $D_{c_1}(t) = \alpha^2 t^2$. (11)

Отсюда:

$$\sigma_{c_1} = \sigma(t); \ (t < 2 \text{ y}). \tag{12}$$

Таким образом, при (*t* < 2 ч) СКП счисления, обусловленная воздействием не учитываемого течения, нарастает по линейному закону.

Учитывая, что дисперсия счисления равна сумме дисперсий по координатным осям, радиальная СКП счисления при t < 2 ч будет равна

$$M_c(t) = 1, 4\sigma(t). \tag{13}$$

Анализ формул (2)-(4) показывает, что при больших интервалах счисления, т.е. при t > 2 ч, всеми слагаемыми в крайних скобках кроме первого можно пренебречь. При этом указанные формулы упрощаются и принимают вид:

$$D_{c_1}(t) = \frac{2\sigma^2 t}{\alpha}; \ \sigma_{c_1}(t) = k_1 \sqrt{t};$$
 (14)

$$D_{c_2}(t) = \frac{2\sigma^2 \alpha t}{\alpha^2 + \beta^2}; \quad \sigma_{c_2}(t) = k_2 \sqrt{t};$$
(15)

$$D_{c_3}(t) = \frac{4\sigma^2 \alpha t}{\alpha^2 + \beta^2}; \quad \sigma_{c_3}(t) = k_3 \sqrt{t},$$
(16)

где: коэффициенты $k_1 = \sigma \sqrt{\frac{2}{\alpha}}$, $k_2 = \sigma \sqrt{\frac{2\alpha}{\alpha^2 + \beta^2}}$, $k_3 = \sigma \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha^2 + \beta^2}}$ используются в

случае, когда автокорреляционная функция описывается выражениями (2) – (4) соответственно. Следовательно, при t > 2ч погрешности счисления изменяются по закону параболы пропорционально \sqrt{t} . При этом скорость нарастания погрешности зависит от характера течения.

Подставив в выражения для коэффициентов *k* параметры из таблицы 1, можно определить их ориентировочные пределы:

$$0,9 \le k \le 2,2.$$
 (17)

Учитывая, что автокорреляционные функции проекций скорости течения на координатные оси примерно одинаковы, радиальная СКП счисления, обусловленная воздействием не учитываемого течения, будет в $\sqrt{2}$ раза больше каждой из линейных погрешностей, т.е.

$$M_c(t) = 1.4 \text{ k} \sqrt{t}$$
 (18)

С учётом погрешности знания элементов течения, СКП счисления пути АНПА рассчитывается по формуле:

$$M_{cy} = \sqrt{M_{CY_0}^2 + M_c^2(t)}.$$
(19)

Суммарная радиальная СКП счисления с учётом дисперсии низкочастотной гармоники составит величину

$$M_{cy} = \sqrt{M_{CY_0}^2 + M_c^2(t) + 2\sigma_{_H}^2 t^2}.$$
(20)

Работоспособность предложенного подхода можно продемонстрировать на следующем примере.

Пусть автокорреляционная функция переменного течения описывается выражением (2). В качестве исходных данных принимаются:

 $V_A = 4 \text{ y3},$ $m_k = 10,$ $m_v = 1 \%,$ $\sigma^2 = 0.2 \text{ y3}^2,$ $\alpha = 0.2$ $\sigma_{_H}^2 = 0.06 \text{ y3}^2.$

Результаты расчётов представлены на графиках рисунка 1.



Рисунок 1. Зависимость СКП счисления пути АНПА (M_{cu}) от суммарного времени его нахождения на маршруте перехода и в районе решения поставленной задачи (t) Примечание: участок АВ соответствует условию t < 2 ч [$M_{cu}(t) = 1, 4\sigma t$]; участок CD соответствует условию t > 2ч [$M_{cu}(t) = 1, 4k_1\sqrt{t}$]

Оценку влияния учёта течения на вероятность попадания АНПА в заданный район при движении аппарата на маршруте перехода по счислению можно продемонстрировать и на следующем примере. Вероятность попадания АНПА в плоскую область площадью S, являющуюся кругом с радиусом R, определяется по формуле:

$$P[(x, y)\sum S] = 1 - \exp\left(-\frac{R^2}{2M_{cy}^2}\right).$$
(21)

Принимая R=5 миль и скорость хода АНПА на маршруте перехода $v_a = 4$ узла, вероятность попадания аппарата в заданный район в зависимости от протяженности маршрута перехода и с учётом рассчитанных $M_{cu}(P)$ будет иметь значения, представленные в таблице 2.

Таблица 2. Вероятности попадания АНПА в заданный район

Протяженность маршрута перехода АНПА в заданный район (мили)	20	18	16	14	12	10	8	6
Вероятность попадания АНПА в заданный район	0,48	0,52	0,57	0,63	0,69	0,76	0,84	0,99

Анализ данных таблицы 2 показывает, что при заданной вероятности попадания АНПА в требуемый район, равной например 0,75-0,85, и при принятых начальных условий решения задачи, маршрут перехода не должен превышать 8-10 миль.

Укрупненный алгоритм математической модели, в которой реализован рассмотренный подход к оценке влияния течения на точность выхода АНПА в район решения задач съёмки природных полей Арктического бассейна, показан на рисунке 2.



Рисунок 2. Укрупненный алгоритм математической модели оценки влияния течения на точность перехода АНПА в заданный район

Литература

1. Разработка методов количественной оценки влияния параметров внешней среды на использование сил, оружия и технических средств ВМФ [Текст]: отчёт о НИР/ в/ч 62728, шифр работы «Букинист», науч. рук. А.Н. Добротворский. – Л., 1987.

2. Исследование влияния и оценка воздействий геофизических процессов и среды на боевую эффективность комплексов оружия [Текст]: отчёт о НИР/ в/ч 62728, шифр работы «Рывок», науч. рук. Н.А. Нестеров. – Л., 1989.

3. Беляев, Б. Н. Влияние переменного течения на точность плавания судна [Текст]: научное издание/ Б. Н. Беляев. – Л.: ЛПИ им. М. И. Калинина, 1977.

4. Емельянов, А. Е. Теория поиска в военном деле, научное издание/ А. Е. Емельянов, В. А. Абчук, В. П. Лапшин, В. Г. Суздаль. – М.: Воениздат, 1964.

УПРАВЛЕНИЕ БУКСИРУЕМЫМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

С.А. Гайворонский

Институт кибернетики Томского политехнического университета 634050, Томск, ул. Советская, 84/3, тел./факс: (3822) 420588, e-mail: saga@tpu.ru

В докладе рассматривается структура системы управления буксируемым подводным аппаратом, позволяющая демпфировать его колебания в условиях морского волнения. Основу системы составляет контур управления амортизирующей лебедкой, располагающейся на подводном аппарате. Для управления лебедкой предложено использовать робастный ПИИ² – регулятор, синтезируемый на основе коэффициентного метода по критерию максимальной степени робастной устойчивости в условиях интервальной неопределенности параметров системы. Работоспособность системы управления подводным аппаратом с синтезированным регулятором подтверждают результаты цифрового моделирования.

Введение

В настоящее время, согласно [1], остаются актуальными некоторые практические задачи, решение которых связано с применением буксируемых подводных аппаратов (БПА), соединенных кабель-тросом с судном-носителем. Системы с БПА характеризуются вертикальными колебаниями подводного аппарата, возникающими под действием морской качки и приводящими к ударам БПА о грунт. Наиболее опасным при этом является возникновение резонансных колебаний за счет совпадения частоты продольных колебаний в тросе с частотой морского волнения.

Задача управления БПА осложняется тем, что некоторые физические параметры системы точно неизвестны или способны изменяться в процессе функционирования по заранее неизвестным законам в определенных пределах (параметры троса, параметры приводов лебедок, масса БПА). Поэтому актуальна разработка системы управления БПА, которая в условиях указанных выше параметрических возмущений должна демпфировать колебания БПА в режимах его спуска-подъема и стабилизации БПА вблизи морского дна.

1. Структура системы управления подводным аппаратом

Для решения поставленной задачи используется система, кинематическая схема которой представлена на рис. 1. Такая система управления БПА содержит две лебедками: судовую лебедку (СЛ), расположенную на судне и предназначенную для спуска-подъема БПА, и амортизирующую лебедку (АЛ), установленную на БПА [1] и служащую для демпфирования его вертикальных колебаний. На рис. 1 обозначены: 1 – судно-носитель; 2 – БПА; 3 – судовая лебедка; 4 – амортизирующая лебедка; 5 – кабель-трос; 6 – дополнительный трос; 7 – замковое соединение; 8 -гермоввод; 9, 13 – электроприводы; 10 – задатчик скорости спуска-подъема БПА; 11, 14 – блоки управления электроприводами; 12, 16 – барабаны лебедок; 15 – измеритель скорости БПА.

На рис. 2 приведена функциональная схема системы, где используются следующие обозначения: 3C – задатчик скорости; CCY – сравнивающее и суммирующее устройство; ДС – датчик скорости, U_{V3} – напряжение задатчика скорости СЛ, V_K - скорость морской качки, $V_{БПA}$ - скорость БПА, $V_{CЛ}$ и $V_{AЛ}$ – соответственно линейные скорости судовой и амортизирующей лебедок; F_H – сила натяжения в тросе, $U_{VБПA}$ – напряжение датчика скорости БПА.

В результате математического описания системы управления БПА получена ее модель в виде структурной схемы, приведенная на рис. 3.



Рис. 1.



Рис. 2.



Рис. 3.

В качестве интервальных параметров системы рассматриваются длина троса между судном-носителем и подводным аппаратом, а также масса подводного аппарата. Заметим, что длина троса входит в такие параметры троса, как жесткость С и потери упругости æ.

Анализ передаточных функций системы управления БПА по возмущению в установившемся режиме с различными регуляторами показал, что в качестве регулятора

скорости БПА целесообразно использовать ПИИ² – регулятор, который обеспечивает в системе астатизм второго порядка. Его передаточная функция имеет вид

$$W_p(s) = \frac{k_0 + k_1 \cdot s + k_2 \cdot s^2}{s^2} \,. \tag{1}$$

Данный регулятор имеет три параметра настройки: k_0 , k_1 , k_2 , значения которых определяют качество переходных процессов в системе.

2. Критерий качества системы управления и метод синтеза регулятора

На основании структурной схемы на рис. 3 определен характеристический полином системы

$$A(s) = a_6 \cdot s^6 + a_5 \cdot s^5 + a_4 \cdot s^4 + a_3 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0.$$
(2)

В коэффициенты полинома (2) линейно входят настройки регулятора и полилинейно входят интервальные параметры системы. Используя правила интервальной арифметики, полином (2) приведен к интервальному виду

$$A(s) = [a_6] \cdot s^6 + [a_5] \cdot s^5 + [a_4] \cdot s^4 + [a_3] \cdot s^3 + [a_2] \cdot s^2 + [a_1] \cdot s + [a_0],$$
(3)
где [a_i] – интервальные коэффициенты, заданные верхними и нижними пределами.

Существуют различные подходы к синтезу систем с интервальными параметрами [2]. В данной работе синтез робастного регулятора (1) системы управления БПА предлагается проводить с помощью коэффициентного метода [3], использующего соотношения между коэффициентами полинома (3) и корневыми показателями качества системы. При этом критерием синтеза регулятора выбран критерий максимальной степени устойчивости. Известно [4], что системы, синтезированные по этому критерию, обладают более высоким быстродействием, меньшим перерегулированием и большим запасом устойчивости. С этой точки зрения могут быть полезными предложенные в [3] достаточные условия заданной степени устойчивости η, выполнение которых гарантирует, что время переходного процесса в системе будет не более того, которое определяется величиной п. Методики синтеза робастного регулятора, основанные на максимизации η, рассмотрены в работах [5-8].

Пусть линейная стационарная система имеет характеристический полином

$$A(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0.$$
⁽⁴⁾

Тогда, согласно [3], достаточные условия заданной степени устойчивости η имеют вид

$$\begin{cases} \frac{a_{i-1}a_{i+2}}{\left[a_{i}-a_{i+1}\left(n-i-1\right)\eta\right]\left[a_{i+1}-a_{i+2}\left(n-i-2\right)\eta\right]} < 0,465, \quad i = \overline{1,n-2};\\ a_{l}-a_{l+1}\left(n-l-1\right)\eta \ge 0, \quad l = \overline{1,n-1};\\ a_{0}-a_{1}\eta + \frac{2a_{2}\eta^{2}}{3} \ge 0. \end{cases}$$
(5)

Выполнение условий (5) обеспечивает расположение корней характеристического полинома (4) левее вертикальной прямой, проходящей через точку (-η, j0).

Увеличение п в (5) позволяет найти его максимальное значение, которое можно рассматривать как оценку снизу степени устойчивости системы. Обозначим ее через n^{*}. Задачей синтеза регулятора при этом является выбор таких его настроек \vec{k} , при которых достигается максимум η^* . Обозначим этот максимум через η^*_{max} . Таким образом, $\eta^*_{max} = \max_k \eta^*$, где η^*_{max} – оценка снизу максимальной степени устойчивости системы. Она является своего рода квазимаксимальной степенью устойчивости системы.

При наличии в системе интервальных параметров приведем характеристический полином (4) к виду $A(s) = [a_n]s^n + [a_{n-1}]s^{n-1} + ... + [a_0], \quad \underline{a_i(\bar{k})} \le \overline{a_i(\bar{k})}, \quad i = \overline{0, n}.$ Для синтеза робастного регулятора, обеспечивающего в интервальной системе квазимаксимальную степень устойчивости, левые части первого неравенства системы (5) должны принимать максимальные значения, а второго и третьего неравенств – минимальные значения. В результате получаем

$$\begin{cases} \frac{\overline{a_{i-1}(\bar{k})}\overline{a_{i+2}(\bar{k})}}{\left[\frac{a_{i}(\bar{k})}{a_{i+1}(\bar{k})}(n-i-1)\eta\right]\left[a_{i+1}(\bar{k})-\overline{a_{i+2}(\bar{k})}(n-i-2)\eta\right]} = 0,465, \quad i = \overline{1, n-2}; \\ \frac{\overline{a_{j-1}(\bar{k})}\overline{a_{j-1}(\bar{k})}\overline{a_{j+2}(\bar{k})}}{\overline{a_{j-1}(\bar{k})}\overline{a_{j+2}(\bar{k})}} < 0,465, \quad j = \overline{1, n-2}, \quad j \neq i; \\ \frac{\overline{a_{j}(\bar{k})}-a_{j+1}(\bar{k})}{(n-l-1)\eta}\left[a_{j+1}(\bar{k})-\overline{a_{j+2}(\bar{k})}(n-j-2)\eta\right]} < 0,465, \quad j = \overline{1, n-2}, \quad j \neq i; \end{cases}$$
(6)
$$\frac{a_{l}(\bar{k})}{a_{0}(\bar{k})}-\overline{a_{l+1}(\bar{k})}(n-l-1)\eta \ge 0, \quad l = \overline{1, n-1}; \\ \frac{a_{0}(\bar{k})}{a_{0}(\bar{k})}-\overline{a_{1}(\bar{k})}\eta + \frac{2a_{2}(\bar{k})\eta^{2}}{3} \ge 0. \end{cases}$$

Относительно коэффициентов $a_{i+1}(\bar{k})$ и $a_{j+1}(\bar{k})$ установлено, что они для выполнения указанных выше требований могут принимать как минимальные, так и максимальные значения. Очевидно, что количество условий в системе (6) зависит от порядка характеристического полинома рассматриваемой системы.

3. Анализ системы управления с синтезированным регулятором

На основе предложенного коэффициентного метода выполнен параметрический синтез регулятора системы управления БПА. Для проверки работоспособности системы с синтезированным регулятором проведено ее моделирование в пакете Matlab. Проверка функционирования системы в условиях морской качки проводилась при изменении скорости качки по гармоническому закону с амплитудой 1 м/с и частотой 1,5 рад/сек. Сигнал задатчика скорости задавался в трапецеидальном виде, (разгон – равномерный спуск - торможение) при изменении глубины погружения БПА с 100 м до 120 м. Масса БПА при этом менялась от 300 кг до 350 кг. Моделирование показало, что при наихудших значениях интервальных параметров системы амплитуда колебаний скорости БПА от действия морской качки незначительна и максимально составляет 0,03 м/с (рис.4). Из рис. 5 видно, что без использования системы управления БПА амплитуда колебаний скорости БПА равна амплитуде морской качки - 1 м/с.



Таким образом, предложенная структура системы управления буксируемым подводным аппаратом и настройка ее робастного регулятора позволяют решать задачу демпфирования колебаний БПА в условиях морского волнения и изменения интервальных параметров системы.

Заключение

В докладе рассмотрена структура системы управления БПА, способная компенсировать влияние качки судна-носителя при погружении БПА и вблизи морского дна. Для настройки параметров используемого в системе регулятора применен коэффициентный метод и критерий максимальной степени устойчивости. Эффективность работы спроектированной системы подтверждена результатами ее моделирования в пакете MATLAB в различных режимах функционирования, соответствующих граничным значениям интервальных параметров системы.

Проведенные исследования выявили ряд новых задач, решение которых позволит улучшить качество работы системы управления БПА. В частности, представляется целесообразным разработка методики синтеза робастных регуляторов при учете различных сопутствующих нелинейностей в системе (например, трение о воду). Представляет интерес также использование в качестве модели морской качки специального фильтра, формирующего более реальное нерегулярное морское волнение.

Литература

1. Г.Е. Кувшинов, Л.А. Наумов, К.В. Чупина. Влияние морского ветрового волнения на глубоководный привязной объект: монография. Владивосток: Дальнаука, 2008. - 215 с.

2. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002 – 303 с.

3. Петров Б.Н., Соколов Н.И., Липатов А.В. и др. Системы автоматического управления объектами с переменными параметрами: Инженерные методы анализа и синтеза. – М.: Машиностроение, 1986. – 256 с.

4. Шубладзе А.М. Способы синтеза систем управления максимальной степени устойчивости // Автоматика и телемеханика. – 1980. – № 1. – С. 28–37.

5. Т.А. Езангина, С.А. Гайворонский. Настройка ПИД-регулятора для максимизации степени устойчивости интервальной системы // Вестник Науки Сибири Томского политехнического университета, 2012. – т.4 – № 3. – С.143–147.

6. Гайворонский С.А., Пушкарёв М.И. Параметрический синтез ПИ-регулятора линейной САУ на основе коэффициентных оценок степени устойчивости и заданной добротности // Известия Томского политехнического университета - 2012. - Т. 320, № 5. - С. 85-89.

7. Гайворонский С. А., Езангина Т. А. Настройка ПИД-регулятора для максимизации степени устойчивости интервальной системы // Автоматизация процессов управления. - 2013 - №. 1. - С. 86-91.

8. Пушкарёв М. И., Гайворонский С. А. Параметрический синтез робастного регулятора, обеспечивающего квазимаксимальную степень устойчивости интервальной системы // Доклады ТУСУР. - 2012 - №. 2(26), ч. 1. - С. 162-165.

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ НПА

С.В. Мальцева, А.А. Кушнерик, А.Ю. Быканова

Институт проблем морских технологий ДВО РАН. 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел /факс: (423) 2432416,

А.В. Жолобов

Дальневосточный федеральный университет, Инженерная школа 690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8

Необитаемый подводный аппарат (НПА) в современном мире становится востребованным инструментом при проведении работ под водой. Многие компании из разных стран занимаются производством НПА как в единственном варианте, так и мелкими сериями. Тем не менее, несмотря на бурное развитие подводной робототехники, на сегодняшний день эта область по большей части является экспериментальной, и весь процесс от проекта до создания рабочего образца НПА связан со значительными финансовыми и временными затратами.

Проектирование необитаемых подводных аппаратов – сложный трудоемкий процесс, состоящий из множества взаимосвязанных операций. При разработке проекта НПА конструктор должен осуществить разработку базовой концепции проекта (согласно техническому заданию), создать математические модели для расчета основных показателей эффективности; оценить множество альтернативных вариантов для удовлетворения предъявляемым требованиям. Появление САПР существенно сократило сроки при проектировании и оптимизации НПА, позволяя получить достаточно полные данные о весовых, прочностных, мореходных и гидродинамических характеристиках будущего аппарата уже на начальных стадиях работы. Все элементы конструкции можно с необходимой детализацией спроектировать, создав электронные модели изделия, учтя все особенности элементов, проверить собираемость деталей и узлов.

Чертежи, автоматически построенные по электронным моделям изделий, заведомо отражают геометрию создаваемой детали, снижая процент производственного брака.

Например, САПР Inventor компании Autodesk, используемый в ИПМТ ДВО РАН представляет собой приложение для автоматизированного объектно-ориентированного конструирования твердотельных моделей изделий машиностроения и включает в себя чертежные, расчетные и моделирующие блоки, что позволяет создать модель подводного аппарата, проверить ее прочностные характеристики и определить дифферент, остойчивость и гидродинамические параметры. Широкое распространение получил также САПР SolidWorks (SW), обладающий похожими характеристиками и широко используемый в ДВФУ.

Стоит заметить, что применение данных вычислительных систем не может заменить реальных испытаний, проводить которые по-прежнему необходимо, но позволяет снизить процент аварий.

Созданная электронная модель изделия может послужить основой для инженерных расчетов и моделирования. При этом можно напрямую использовать данные аналитических расчетов для оптимизации массогабаритных характеристик.

В качестве примера можно привести используемое в ИМПТ и ДВФУ проектирование и гидродинамическое моделирование движительного комплекса НПА.

При проектировании движителя НПА в качестве исходных данных используются характеристики двигателя, задается диаметр винта. Геометрия лопасти винта рассчитывается на основе известных формул и описывается аэродинамическими профилями.

Созданная электронная модель движительного комплекса передается в пакет для гидродинамических расчетов. В качестве начальных условий помимо геометрии задаются размеры расчетной области, характеристики среды и скорость вращения винта, результатом расчета является тяга винта. Для построения тяговой характеристики рассчитывается упор винта при разных значения скорости вращения как при прямом, так и при реверсивном вращении. Например, расчет тяговой характеристики по 18 точкам при прямом и реверсном вращении с учетом использования 4-х процессорного сервера (без учета подготовки модели, задания начальных условий, подбора параметров расчета, тестовых расчетов) занимает около 23 часов.



Рис. 1 Гидродинамический расчет гребного винта.

Грамотное применение имеющихся САПР значительно уменьшает сроки и стоимость работ по проектированию и моделированию НПА, и наиболее затратным этапом работ становится само изготовление опытного образца. Помимо высокой стоимости материалов и оборудования это вызвано, в том числе, и высокими трудозатратами на изготовление как сложных подсистем в целом, так и отдельных деталей на имеющейся производственной базе, в российских реалиях зачастую устаревшей.

В некоторых случаях решением может быть использование получившей большое развитие за последние годы технологии «быстрого прототипирования».

«Быстрое прототипирование «(Rapid Prototyping, RP) (часть аддитивных технологий) – это метод послойного синтеза (построения, выращивания) физической модели (прототипа) в соответствии с геометрией САД-модели.

Основное отличие этой технологии от традиционных методов изготовления заключается в том, что модель создается не отделением материала от заготовки, как при работе на станке, а послойным наращиванием материала, составляющего модель, включая входящие в нее внутренние и даже подвижные части.

Процессы построения в значительной степени автоматизированы и позволяют получать качественные и сравнительно недорогие модели, затрачивая на их изготовление часы, а не дни и недели, как при использовании традиционных методов.

Модели, выполненные методом аддитивных технологий, могут изготавливаться из различных материалов (в зависимости от применяемой в оборудовании технологии): из специальных порошков металлов и пластмасс, жидких полимерных смол, воска, пластиков, различных листовых материалов

В ИПМТ ДВО РАН при сотрудничестве с ДВФУ аддитивную технологию «быстрого прототипирования» начали использовать с 2010 года.

Например, при создании движительной системы НПА ранее гребные винты изготавливались из алюминиевого сплава на станках с ЧПУ. Из-за сложности детали на изготовление одного винта тратилось порядка 70 человеко-часов.



Рис.2 «3D принтер» в лаборатории ДВФУ.

Создание модели-прототипа винта при помощи аддитивной порошковой технологии позволило не только уточнить все гидродинамические характеристики движителя во время бассейновых испытаний, но и изготовить формы для литья под давлением, и далее производить уже пластиковые гребные винты практически серийно, что на порядок снизило стоимость изделия.



Рис. 3. Модели гребных винтов, изготовленные по аддитивным технологиям.



Рис. 4. Готовые изделия (слева – традиционный винт из АМг5, справа- пластиковые)

В дальнейшем этот способ получения гребных винтов и насадок к ним использовался и для других аппаратов.



Рис. 5. Гребные винты и насадки для АНПА

Также модели, изготовленные по аддитивным технологиям, широко используются при изготовлении различных обтекателей. Ранее для изготовления обтекателя сложной формы было необходимо создать модель из дерева, пенопласта, в некоторых случаях пластилина, что требовало достаточно много времени и ручной работы. Далее следовала трудоемкая оклейка стеклотканью в несколько слоев, в итоге время изготовления могло занимать недели, а то и месяцы.

Сейчас при наличии электронной модели печать и дальнейшая доводка изделия занимают не более одной рабочей недели.



Рис. 6. Пример обтекателей, изготовленных по аддитивным технологиям.

В результате использования современных вычислительных комплексов проектирования и расчета, а также применения аддитивных технологий, стало возможно снизить ряд трудовых, временных, а также финансовых затрат на создание НПА.

Литература

1. Фаге Н. М. Технологии быстрого прототипирования в современном производстве.

http://www.sibai.ru/texnologii-byistrogo-prototipirovaniya-v-sovremennom-proizvodstve.html

2. Войткунский Я.И. Справочник по теории корабля. Том 1, Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. Л: Судостроение, 1985.

3. Войткунский Я.И., Першиц Г.Я., Титов И.А. Справочник теории корабля (судовые движители, управляемость) Л: Судостроение, 1973.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СОЗДАНИЮ ПРОЧНЫХ КОРПУСОВ ГЛУБОКОВОДНЫХ АППАРАТОВ ИЗ СТЕКЛОМЕТАЛЛОКОМПОЗИТА

В.В. Пикуль

Институт проблем морских технологий ДВО РАН 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел/факс (423) 2432416, e-mail: pikulv@mail.ru

В докладе представлены новые результаты исследований по созданию прочных корпусов глубоководных аппаратов из стеклометаллокомпозита. Цилиндрические оболочки прочного корпуса из стеклометаллокомпозита сопоставлены с цилиндрическими оболочками из высокопрочного титанового сплава. Приведены результаты испытаний цилиндрических оболочек из стеклометаллокомпозита.

Стеклометаллокомпозит состоит из стеклянного слоя, облицованного металлическими обшивками. В процессе формирования металлические обшивки надежно соединяются со стеклянным слоем, стягивая его поверхности и, тем самым, предотвращают образование поверхностных микротрещин в стекле. В результате стеклянный слой приобретает необычайно высокую прочность и ударную стойкость [1 – 5]. Металлические обшивки в составе стеклометаллокомпозита предохраняют стеклянный слой от вредного воздействия окружающей среды.

Стекло по своей природе является наноструктурированным материалом. Но природа, создав естественный наноструктурированный материал, снабдила его эффективным поверхностных механизмом разрушения В виде микротрещин. В составе стеклометаллокомпозита стеклянный слой освобождается от поверхностных микротрещин и приобретает теоретическую прочность. В настоящее время во всем мире ведутся интенсивные исследования по созданию наноструктурированных материалов. Применение конструкционных наноматериалов позволяет значительно уменьшить толшины конструктивных элементов инженерных сооружений, что ведет к повышению их эффективности. Однако уменьшение толщины конструктивных элементов резко снижает сопротивляемость инженерных сооружений к потере устойчивой формы равновесия. Надежность эксплуатации инженерных сооружений ИЗ наноструктурированных конструкционных материалов будет определяться в основном устойчивостью их конструктивных элементов. Сопротивляемость конструктивных элементов к потере устойчивости определяется их изгибной жесткостью, которая для изотропного материала находится по следующей формуле:

$$D=\frac{E\,h^3}{12\left(1-v^2\right)},$$

где: *Е* - модуль нормальной упругости (модуль Юнга); *h* - толщина конструктивного элемента; *v* - коэффициент Пуассона.

В таблице 1 приведена сравнительная оценка сопротивляемости конструктивных элементов инженерных сооружений к потере устойчивости в предположении, что конструкционным металлам удастся придать наноструктуру и довести их прочность до теоретического уровня (теоретическая прочность равна *0,1E*).

Материал	Е,МПа	р,кг/м ³	$D, MП a \cdot M^3$	<i>h,м</i>	т,кг / м ³	m/m_{cm}
Сталь	200000	7750	18315	0,0100	7750	1,000
Титан	120000	4500	18315	0,0117	5283	0,682
Алюминий	70000	2700	18315	0,0142	3831	0,494
Стекло	95000	2520	18315	0.0130	3315	0.428

Таблица 1. Сравнительная оценка наноструктурированных наноматериалов по сопротивляемости конструктивных элементов к потере устойчивости

В таблице 1 дополнительно использованы следующие обозначения: ρ - плотность материала; *m* - масса одного кубического метра равно устойчивой конструкции. Рассмотрено силикатное стекло 14,5 MgO+14,5 Al_2O_3 +71 S_iO_2 с пространственной наноструктурой.

Из данных, приведенных в таблице 1, следует, что наименьшую массу конструкции при одинаковой сопротивляемости к потере устойчивости придает силикатное стекло. Более того, стекло обладает естественной наноструктурой и в составе стеклометаллокомпозита оно приобретает теоретическую прочность. Создание же наноструктуры у конструкционных металлов является проблемой, которую неизвестно когда удастся разрешить в полной мере. Но даже в самом благоприятном для металлов исходе стекло оказывается вне конкуренции.

Эффективность применения стеклометаллокомпозита в глубоководной технике представлена в таблице 2.

Наименование	Титановый сплав ВТ 22	Стеклометаллокомпозит
Внутренний диаметр, мм	500	500
Толщина, мм	20,5	30,0
Длина, <i>мм</i>	1000	1000
Количество шпангоутов	3	0
Предел прочности, МПа	1150,0	9000,0
Относительная прочность	1	7,83
Критическое давление, <i>МПа</i>	93,2	92,9
Масса, кг	166,3	127,4
Плотность, r/cm^3	0,723	0,517
Стоимость, руб.	249477,0	5185,4
Относительная стоимость	1	1/48,1

Таблица 2. Сопоставление эффективности применения цилиндрических оболочек в качестве прочного корпуса подводного аппарата при глубине погружения 6000 *м*

При одинаковом внутреннем объеме цилиндрические оболочки из стеклометаллокомпозита оказываются значительно легче и почти в 50 раз дешевле цилиндрических оболочек из высокопрочного титанового сплава.

Для проведения испытаний цилиндрических оболочек из стеклометаллокомпозита была изготовлена экспериментальная партия образцов оболочек прочного корпуса глубоководной техники, состоящая из шести цилиндрических оболочек, изготовленных из трехслойного стеклометаллокомпозита, и одной цилиндрической оболочки из двухслойного стеклометаллокомпозита. Размеры цилиндрических оболочек из трехслойного

стеклометаллокомпозита: длина 100 мм, внешний диаметр 83 мм, толщина оболочки состоит из трех слоев: внешний слой из алюминия равен 2 мм, промежуточный слой из силикатного стекла равен 8 мм и внутренний слой из алюминия имеет толщину 1 мм. Размеры цилиндрической оболочки из двухслойного стеклометаллокомпозита: длина 130 мм, внешний диаметр 83 мм, толщина оболочки состоит из двух слоев: внешний слой из алюминия равен 1,5 мм, внутренний слой из силикатного стекла равен 5 мм.

Цилиндрическая оболочка из двухслойного стеклометаллокомпозита изготовлена по отработанной технологии, в соответствии с патентом РФ № 2337036 [10]. Цилиндрические оболочки из трехслойного стеклометаллокомпозита изготовлены по вновь предлагаемой технологии, на которую подана заявка в Роспатент: Заявка № 2012107965 с приоритетом от 01.03.2012 г. на изобретение «Способ изготовления цилиндрической оболочки прочного корпуса подводного аппарата из стеклометаллокомпозита».

Испытания экспериментальных образцов оболочек из стеклометаллокомпозита проведены в соответствии Методикой Института проблем морских технологий ДВО РАН испытаний прочных контейнеров (ПК) подводных технических средств с глубиной погружения до 6000 метров в гидростатических камерах высокого давления (УГВД) - ИУПМ.360154.001.

Перед проведением испытаний произведена подготовка цилиндрических оболочек из стеклометаллокомпозита к испытаниям, которая заключается в следующем. Нижние торцы цилиндрических оболочек закрываются заглушками в виде круглых плит, которые для обеспечения водонепроницаемости снаружи покрываются резиновыми трубками, обтягиваемыми для плотного прилегания к оболочкам и плитам металлическими хомутами. Оболочка заполняется на 90 % от полного объёма рабочей жидкостью и наглухо закрывается второй заглушкой.

Испытания проводились по следующей программе: проверялась статическая прочность оболочек давлением $70 M\Pi a (700 \kappa c c/cm^2)$; испытывалась цилиндрическая оболочка циклической нагрузкой в диапазоне от нуля до $65 M\Pi a (650 \kappa c c/cm^2)$; проверялась статическая прочность оболочек на предельно допустимое для камеры давление в $80 M\Pi a (800 \kappa c c/cm^2)$.

Проверка статической прочности оболочек давлением $70 M\Pi a (700 \kappa c / cm^2)$. Оболочку загружали в камеру высокого давления, герметизировали камеру и ступенями по $5 M\Pi a (50 \kappa c / cm^2)$ с выдержкой на каждой ступени по 5 минут повышали давление в камере. При достижении давления в $70 M\Pi a (700 \kappa c / cm^2)$ производили выдержку в течение 15 минут. Сбрасывали давление до нуля, открывали камеру и извлекали из неё оболочку. Открывали верхнюю заглушку и проверяли наличие объема, не заполненного рабочей жидкостью.

Испытание цилиндрической оболочки циклической нагрузкой в диапазоне от нуля до $65 M\Pi a (650 \kappa c / cm^2)$. Оболочку загружали в камеру высокого давления, герметизировали камеру и ступенями по $10 M\Pi a (100 \kappa c / cm^2)$ с выдержкой на каждой ступени по 5 минут повышали давление в камере до $65 M\Pi a (650 \kappa c / cm^2)$. Производили плавную разгрузку давления до нуля. Далее по той же программе производили нагружение оболочки давлением и её разгрузку. После десяти циклов нагружения и разгрузки открывали камеру и извлекали из неё оболочку. Открывали верхнюю заглушку и проверяли наличие объема, не заполненного рабочей жидкостью.

Проверка статической прочности оболочек на предельно допустимое для камеры давление в $80 M\Pi a (800 \kappa c / cm^2)$. Оболочку загружали в камеру высокого давления, герметизировали камеру и ступенями по $5 M\Pi a (50 \kappa c / cm^2)$ с выдержкой на каждой ступени по 5 минут повышали давление в камере. При достижении давления в $80 M\Pi a (800 \kappa c / cm^2)$ производили выдержку в течение 15 минут. Сбрасывали давление до

нуля, открывали камеру и извлекали из неё оболочку. Открывали верхнюю заглушку и проверяли наличие объема, не заполненного рабочей жидкостью.

Все испытанные цилиндрические оболочки из стеклометаллокомпозита успешно выдержали полную программу испытаний: статическую прочность давлением $70 M\Pi a (700 \kappa c / cm^2)$; десять циклов нагружения и разгрузки в диапазоне от нуля до $65 M\Pi a (650 \kappa c / cm^2)$; статическую прочность на предельно допустимое для камеры давление в $80 M\Pi a (800 \kappa c / cm^2)$.

По результатам испытаний цилиндрических оболочек из стеклометаллокомпозита установлено, что стеклянный слой стеклометаллокомпозита успешно выдержал напряжения сжатия, равные 735 МПа. Расчетная плотность цилиндрических оболочек из стеклометаллокомпозита, при условии, что толщины внешней и внутренней алюминиевых облицовок составят соответственно одну десятую и одну сотую от толщины стеклянного слоя, равна $0.648 \epsilon / cm^3$.

Результаты испытаний цилиндрических оболочек из стеклометаллокомпозита показали, что стеклометаллокомпозит обладает существенно большей прочностью, чем существующие конструкционные металлы. Его применение в глубоководной технике позволит решить основную проблему глубоководной техники – отказаться от дополнительных объемов плавучести. Это позволит не только существенно повысить эксплуатационные свойства глубоководной техники, но и резко снизить затраты по её изготовлению.

На рисунках 1 и 2 представлены фотографии подготовки образцов к испытаниям в гидростатической камере высокого давления.



Рис. 1. Цилиндрическая оболочка с заглушками



Рис. 2. Цилиндрическая оболочка, подготовленная к испытаниям

Применение стеклометаллокомпозита позволит существенно повысить тактикотехнические и экономические показатели глубоководной техники:

прочные корпуса глубоководной техники приобретут достаточную положительную плавучесть для работы на любых глубинах Мирового океана, вплоть до предельных [3].

Предложен и теоретически обоснован новый класс конструкционных наноматериалов на основе стекла – стеклометаллокомпозиты [1 – 5]. Получено девять патентов РФ на изобретения различных способов изготовления изделий из стеклометаллокомпозита [6 – 14] и два положительных решений на выдачу патентов РФ.

Установлена возможность соединения обшивок из алюминиевых сплавов со стеклянным слоем стеклометаллокомпозита [4].

Создана лабораторная установка для изготовления цилиндрических оболочек из стеклометаллокомпозита. Изготовлены и испытаны на гидростатическое давление образцы цилиндрических оболочек из стеклометаллокомпозита, предназначенные для работы на глубине 6000 м.

Литература

1. Пикуль В.В. Перспективы создания композита на основе стекломатериалов // Перспективные материалы, 1999. № 1. – С. 61 - 64.

2. Пикуль В.В. Эффективность стеклометаллокомпозита // Перспективные материалы, 2000. №6. – С. 63 - 65.

3. Пикуль В.В. К созданию композиционного наноматериала на базе стекла // Перспективные материалы, 2008. № 3. – С. 78 - 83.

4. Пикуль В.В., Гончарук В.К. Композиционный наноматериал на основе стекла – стеклометаллокомпозит // Все материалы. Энциклопедический справочник, 2009. № 6. – С. 5 - 9.

5. Пикуль В.В. Перспективы создания прочных корпусов глубоководной техники из стеклометаллокомпозита // Судостроение, 2000. № 4. - С. 14 – 16.

6. Патент РФ № 2067060. Способ изготовления оболочки прочного корпуса подводного аппарата // Пикуль В.В. - 27.09.96. Бюл. № 27.

7. Патент РФ № 2196747. Способ изготовления композиционного изделия // Пикуль В.В. - 20.01.2003. Бюл. № 2.

8. Патент РФ № 2243900. Способ изготовления композиционного изделия на основе стекла // Пикуль В.В. - 10.01.2005. Бюл. № 1.

9. Патент РФ № 2304117. Способ изготовления стеклометаллокомпозита // Пикуль В.В. - 10. 08. 2007. Бюл. № 22.

10. Патент РФ № 2337036. Способ изготовления цилиндрической оболочки прочного корпуса подводного аппарата // Пикуль В.В., Наумов Л.А., Гончарук В.К. - 27.10. 2008. Бюл. № 30.

11. Патент РФ №2361770. Способ изготовления цилиндрической оболочки прочного корпуса подводного аппарата из стеклометаллокомпозита // Пикуль В.В. - 20.07. 2009. Бюл. № 20.

12. Патент РФ № 2361771. Способ изготовления цилиндрической оболочки прочного корпуса подводного аппарата из стеклометаллокомпозита // Пикуль В.В. - 20.07. 2009. Бюл. № 20.

13. Патент РФ № 2425776. Водонепроницаемый прочный корпус подводного аппарата из стеклометаллокомпозита // Пикуль В.В. – 10.08.2011. Бюл. № 22.

14. Патент РФ № 2433969. Способ изготовления трубы из стеклометаллокомпозита // Пикуль В.В. – 20.11.2011. Бюл. №32.
ОЦЕНКА ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Д.Г. Ляхов¹, Н.С. Штырхун²

¹Институт проблем морских технологий ДВО РАН 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел./факс: (4232) 432416, e-mail: lyakhov@marine.febras.ru

²Дальневосточный федеральный университет 690950, Владивосток, Суханова, 8, тел./факс: (4232) 432706, e-mail: nikname_one@mail.ru

Рассматриваются подходы к оценке экономической эффективности необитаемого подводного аппарата (НПА) как элемента инноваций производственной деятельности компании в области подводного строительства и связанных с ним инженерных изысканий.

Область коммерческого применения НПА

НПА гражданского применения по ряду признаков и учитывая опыт применения подобной техники за рубежом можно отнести к продукции производственно-технического назначения. Для предприятия-владельца НПА выступает в качестве элемента основного производственного фонда, аналогично трактору или геодезическому прибору. Основным критерием экономической эффективности НПА, таким образом, можно считать максимизацию прибыли предприятия связанную с эксплуатацией аппарата.

Рассмотрение НПА как инструмента выполнения работ, к которому применимы оценки экономической эффективности, осложняется несколькими факторами.

Во-первых, морская деятельность РФ под водой сводилась до самого последнего времени только к оборонной, в частности, поисковой. Созданные образцы НПА относились к ВТ и по своей сути в экономике применятся, не могли [1]. Что явно подтверждается в ходе текущих проектов типа освоения Киринского месторождения и строительства морского участка Южного потока. Несмотря на некоторую схожесть обзорно поискового гидролокатора и многолучевого эхолота, применяемых для съемки морского дна, разница между ними такая же принципиальная как между биноклем у солдата и теодолитом у геодезиста.

Во-вторых, развитие подводной техники не вполне является механизацией и автоматизацией труда водолазов, как это происходило в обычном строительстве. Поэтому провести сравнительную оценку водолазного и робототехнического метода выполнения конкретной работы в сходных условиях не представляется возможным. Телеуправляемые аппараты рабочего класса (РТПА) существуют и применяются постольку, поскольку они незаменимы при обустройстве и эксплуатации месторождений на глубинах более 200-400 м, где водолазы не плавают в принципе. В 2010 г. из общемировых 85 млн. б/д в оффшоре добыто 25 из которых на глубинах более 400 м ~5, т.е. около 6 % от общемировой [2]. В Мексиканском заливе с конца 90-х более половины добычи (~1,5 млн. б/д) ведется в секторе Depwater. Именно эти 6% и являются определяющим условием работы сотен РТПА (Work class ROV) и десятка АНПА (Survey AUV) [3,4]. Если принять, что в среднем один б/д равен приблизительно 50 т/г., темпы морской добычи в РФ (13 млн т в 2011 г.) можно оценить как 0,26 млн. б/д., причем на глубинах, недоступных водолазам, в настоящий момент ни добыча, ни разработка не ведутся. Вероятно поэтому подводно-технические работы в РФ, в смысле строительства согласно ЕНиР Сборник ЕЗ9, определены только водолазные, но морская геодезия [5] все же оперирует терминами «Подводный съемочный аппарат» и «Автономный

подводный аппарат». В российском коммерческом сегменте на сегодня задействовано 2 РТПА, в мире – около 800-1000 ед., учитывая, что доля морской добычи в РФ от мировой морской составляет порядка 1%, а глубоководных разработок не ведется, это вполне адекватный парк для текущего момента. Для оценки доходности от эксплуатации НПА можно применить инновационный подход.

Методы оценки эффективности инноваций

Метод исчисления доходности инноваций, основанный на сопоставлении результатов их освоения с затратами, позволяет принимать решение о целесообразности использования новых разработок. Для оценки общей экономической эффективности инноваций может использоваться система показателей:

- 1) Интегральный эффект;
- 2) Индекс рентабельности;
- 3) Норма рентабельности;
- 4) Период окупаемости.

1) Интегральный эффект, определенный в формуле (1)представляет собой величину разностей результатов и инновационных затрат за расчетный период, приведенных к одному, обычно начальному году (то есть с учетом дисконтирования результатов и затрат).

$$\mathfrak{B}_{HHT} = \sum_{t=0}^{T_p} (\mathbf{P}_t - \mathbf{3}_t)^* \boldsymbol{\alpha}_t$$
(1)

где Тр – расчетный год; Рt – результат в t-й год; Зt – инновационные затраты в t-й год;

а_t – коэффициент дисконтирования (дисконтный множитель).

Интегральный эффект имеет также другие названия, а именно: чистый дисконтированный доход, чистая приведенная или чистая современная стоимость, чистый приведенный эффект.

2) Индекс рентабельности инноваций Jr.

Рассмотренный метод дисконтирования - метод соизмерения разновременных затрат и доходов, помогает выбрать направления вложения средств в инновации, когда этих средств особенно мало. Данный метод полезен для организаций, находящихся на подчиненном положении и получающих от вышестоящего руководства уже жестко определенный бюджет, где суммарная величина возможных инвестиций в инновации определена однозначно.

В таких ситуациях рекомендуется проводить ранжирование всех имеющихся вариантов инноваций в порядке убывающей рентабельности.

В качестве же показателя рентабельности можно использовать индекс рентабельности. Другие названия: индекс доходности, индекс прибыльности.

Индекс рентабельности представляет собой соотношение приведенных доходов к приведенным на эту же дату инновационным расходам.

Расчет индекса рентабельности ведется по формуле (2):

 \mathbf{J}_{R}

$$=\frac{\sum_{t=0}^{I_p} \mathcal{A}_j^* \boldsymbol{\alpha}_t}{\prod_{t=0}^p \mathbf{K}_t^* \boldsymbol{\alpha}_t},$$
(2)

где JR – индекс рентабельности, Дj – доход в периоде j, Kt – размер инвестиций в инновации в периоде t.

Приведенная формула отражает в числителе величину доходов, приведенных к моменту начала реализации инноваций, а в знаменателе – величину инвестиций в инновации, продисконтированных к моменту начала процесса инвестирования.

Иначе можно сказать – здесь сравниваются две части потока платежей: доходная и инвестиционная.

Индекс рентабельности тесно связан с интегральным эффектом, если интегральный эффект Эинт положителен, то индекс рентабельности JR > 1, и наоборот. При JR > 1 инновационный проект считается экономически эффективным. В противном случае JR < 1 – неэффективен.

Предпочтение в условиях жесткого дефицита средств должно отдаваться тем инновационным решениям, для которых наиболее высок индекс рентабельности.

3. Норма рентабельности Ер представляет собой ту норму дисконта, при которой величина дисконтированных доходов за определенное число лет становится равной инновационным вложениям. В этом случае доходы и затраты инновационного проекта определяются путем приведения к расчетному моменту времени. Соотношение указано в формуле (3):

$$D = \sum_{t=1}^{T} \frac{D_{t}}{(1+E_{p})^{t}}, \quad K = \sum_{t=1}^{T} \frac{K_{t}}{(1+E_{p})^{t}}.$$
(3)

Данный показатель иначе характеризует уровень доходности конкретного инновационного решения, выражаемый дисконтной ставкой, по которой будущая стоимость денежного потока от инноваций приводится к настоящей стоимости инвестиционных средств.

Показатель нормы рентабельности имеет другие названия: внутренняя норма доходности, внутренняя норма прибыли, норма возврата инвестиций.

За рубежом расчет нормы рентабельности часто применяют в качестве первого шага количественного анализа инвестиций. Для дальнейшего анализа отбирают те инновационные проекты, внутренняя норма доходности которых оценивается величиной не ниже 15-20%.

Норма рентабельности определяется аналитически, как такое пороговое значение рентабельности, которое обеспечивает равенство нулю интегрального эффекта, рассчитанного за экономический срок жизни инноваций.

Получаемую расчетную величину Ер сравнивают с требуемой инвестором нормой рентабельности. Вопрос о принятии инновационного решения может рассматриваться, если значение Ер не меньше требуемой инвестором величины.

Если инновационный проект полностью финансируется за счет ссуды банка, то значение Ер указывает верхнюю границу допустимого уровня банковской процентной ставки, превышение которого делает данный проект экономически неэффективным.

В случае, когда имеет место финансирование из других источников, то нижняя граница значения Ер соответствует цене авансируемого капитала, которая может быть рассчитана как средняя арифметическая взвешенная величина плат за пользование авансируемым капиталом.

Инвестирование в условиях рынка сопряжено со значительным риском и этот риск тем больше, чем длиннее срок окупаемости вложений. Очень существенно за это время могут измениться и конъюнктура рынка, и цены. Этот подход неизменно актуален и для отраслей, где наиболее высоки темпы научно-технического прогресса и где появление новых технологий или изделий может быстро обесценить прежние инвестиции.

Ориентация на показатель «период окупаемости» часто избирается в тех случаях, когда нет уверенности в том, что инновационное мероприятие будет реализовано и потому владелец средств не рискует доверить инвестиции на длительный срок.

Расчет периода окупаемости отображен в формуле (4):

$$T_{\mu} = K / \mathcal{A}$$
,

(4)

где К – первоначальные инвестиции в инновации; Д – ежегодные денежные доходы.

Потребительские свойства НПА

Как уже отмечалось типовым потребителем (владельцем) НПА является предприятие, использующее аппарат как средство извлечения прибыли и эксплуатирующее его при выполнении подрядных работ/оказании возмездных услуг. Необходимым условием для выполнения экономических расчетов является наличие максимально точной информации о техническом уровне и эксплуатационных показателях техники, влияющих на стоимостную оценку результатов и затрат от ее применения в заданных условиях. Основными эксплуатационными показателями для РТПА являются

- 1) Масса аппарата/Мобилизационная масса комплекса.
- 2) Габаритные размеры и площадь, занимаемая на рабочей палубе.
- 3) Рабочая глубина.
- 4) Упор (тяговое усилие) и/или скорость перемещения/вращения.
- 5) Величина рабочей зоны ПА.
- 6) Масса полезной нагрузки.

7) Количество степеней свободы, грузоподъемность, величина рабочей зоны манипулятора.

8) Количество штатного персонала.

9) Энергопотребление.

АНПА не производят операций с объектами, поэтому вместо п.п. 4,5,6,7 важными становятся показатели качества и производительности съемки, целиком зависящие от свойств средств измерения/съемки, а также связанные с этим показатели движения и навигационного обеспечения ПА. Энергопотребление так же преобразуется в показатель автономности/выбега на одной зарядке аккумулятора и параметров его зарядки.

10) Производительность съемки (в совокупности со скоростью и хар-ми

- движения).
 - 11) Точность подводной навигации.
 - 12) Автономность, время перезарядки/смены аккумулятора.

В настоящее документально подтвержденные, время не а вышеуказанных конкретных предполагаемые/рекламные значения показателей лля комплексов НПА получить затруднительно. Возможно, со временем производители и поставщики НПА выпустят ТУ или обнародуют акты эксплуатационных испытаний, что позволит произвести экономические расчеты и продолжить предметное изучение данного вопроса.

Литература

1. Агеев, М.Д. Необитаемые подводные аппараты военного назначения: Монография [Текст] / М.Д. Агеев, Л.А. Наумов, Г.Ю. Илларионов [и др.]; Под. ред. М.Д. Агеева. – Владивосток: Дальнаука, 2005. –168 с.

2. Sandrea, R.; Sandrea, I. Deepwater crude oil output: How large will the uptick be? OIL AND GAS JOURNAL; 108, 41; 48-53, 2010

3. Lukas Brun, "ROV/AUV Trends: Market and Technology" Marine Technology Reporter, Sept. 2012

4. Д.Г. Ляхов, С.В. Смирнов, М.И.Чудаков "О применении необитаемых подводных аппаратов в морской нефтедобывающей отрасли", Подводные исследования и робототехника № 1/15 2013

5. ГКИНП-11-140-81. РТМ Топографо-геодезические работы на шельфе и внутренних водоемах. Термины и определения.

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

В.В. Жданов, *Г.Ю. Илларионов, А.В. Краснобрыжий, М.М. Логинова, А.С. Рыкованов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН 194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул. д. 26. v_zhdanov@list.ru

*Институт проблем морских технологий ДВО НАН 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, д. 5а

Литий-ионные аккумуляторные батареи с успехом используются в автономных энергоустановках различного назначения, благодаря их высоким энергетическим, мощностными и эксплуатационным характеристикам. Одно из перспективных направлений применения литий-ионных аккумуляторов – аккумуляторные батареи (АБ) для автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). Характерной особенностью таких АБ является высокое рабочее напряжение, что позволяет избегать больших токов заряда и разряда для лостижения высокой мошности. Обязательной составляющей литий-ионной AБ обеспечивающей ее безопасность и срок службы, является система контроля и управления (СКУ), функции, которой заключаются в отслеживании параметров аккумуляторов и всей АБ и недопущение их выхода за определённые пределы по напряжению, току и температуре. Литий-ионные аккумуляторы сохраняют высокие эксплуатационные характеристики только при соблюдении разрешенных режимов эксплуатации. К важнейшим параметрам данных режимов относятся: конечное разрядное и зарядное напряжение, температура эксплуатации, максимальные токи заряда и разряда. Большое количество последовательно соединенных аккумуляторов в АБ усложняет построение СКУ.

Разрядная емкость АБ зависит от степени разбаланса емкостей аккумуляторов в батарее. Для нивелирования емкостей аккумуляторов в АБ используется система баланса (СБ). В АНПА применяются в основном активные, перераспределяющие энергию между аккумуляторами в составе АБ, системы баланса. Пассивные СБ, переводящие энергию более заряженных аккумуляторов в тепло, применяются для АБ относительно небольшой емкости при ограниченном объёме размещения.

СКУ высоковольтной АБ проектируют двумя основными способами. Первый из них достаточно универсален и включает комплект устройств контроля первого и второго уровня. Каждое устройство первого уровня размещено на отдельной плате и контролирует напряжение и температуру своего аккумулятора, а также содержит блок баланса. Полученные данные, устройства первого уровня, передают в вышестоящее устройство второго уровня. Это устройство контролирует общий ток АБ, управляет работой коммутаторов (зарядного и разрядного), контролирует целостность предохранителей, выводит данные на дисплей, передает данные на устройства первого уровня о включении баланса на том или ином аккумуляторе, и т.д. Если возникает необходимость добавить в состав АБ один или два последовательно соединенных аккумулятора, то в схему включают соответствующее количество дополнительных устройства первого уровня.

Второй способ построения СКУ менее универсален и заключается в том, что одно устройство первого уровня контролирует несколько аккумуляторов. Такое устройство размещается на отдельной плате, а всё остальное остается также как и в описанном выше варианте.

СКУ во втором варианте менее универсальна, чем в первом, так как добавление одного аккумулятора в последовательную цепочку может вызвать трудности связанные с тем, что каждая плата первого уровня может контролировать определенное число аккумуляторов,

больше чем один. Поэтому для добавления одного аккумулятора необходимо переналадить часть или даже все платы первого уровня.

АБ в составе АНПА часто невозможно разместить в одном герметичном контейнере. В подобных случаях применяют систему электропитания, рассредоточенную между несколькими контейнерами. Такую систему можно построить различными способами - по последовательной или по параллельной схеме. Параллельная схема соединения предполагает, что каждый контейнер содержит полноценную АБ от которой АНПА может работать до полного разряда данной АБ. При израсходовании энергии одной АБ нагрузка АНПА переключается на следующую АБ и так далее до полного разряда комплекта АБ. При переключениях с одной АБ на другую, во избежание бросков токов, следует сначала отключить одну АБ, а затем включить другую. В этом случае на короткое время пропадает питание АНПА. Решение данной проблемы возлагается на аппаратные средства АНПА. При параллельном соединении, каждая АБ должна обеспечивать полный ток потребления АНПА при максимальной нагрузке. Недостатком данной схемы электропитания является значительно больший ток для каждой АБ по сравнению со схемой с последовательным соединением АБ.

При последовательной схеме каждый герметичный контейнер представляет собой только часть АБ – модуль АБ. Общее напряжение питания АНПА можно получить, только включив все модули последовательно. Недостатком такой схемы является уменьшение надёжности системы электропитания, так как при выходе из строя одного модуля, АНПА лишается всей энергетики. Для предотвращения такой ситуации используются байпасные коммутаторы, шунтирующие вышедший из строя модуль. Последовательная схема, в сравнении с параллельной, предполагает снижение рабочих токов при повышении общего напряжения АБ. Это позволяет снизить требования по сечениям проводов и токовой нагрузке гермовводов.

При использовании параллельной или последовательной схемы каждая АБ может заряжаться индивидуально от своего зарядного устройства.

В ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН и ИПМТ ДВО РАН имеется опыт создания и эксплуатации высоковольтных батарей на базе литий-ионных аккумуляторов, в том числе применительно к АНПА. На рис. 1а представлен опытный образец высоковольтной батареи. Номинальное напряжение 220 В. Номинальная емкость 7 А ч. Максимальная мощность АБ при разряде током 100 А равна 22 кВт. Масса АБ равна 30 кг. АБ состоит из 60-и последовательно соединенных цилиндрических литий-ионных аккумуляторов. АБ включает комплект СКУ первого и второго уровня. СКУ первого уровня контролируют группы из десяти последовательно соединенных аккумуляторов, содержат управляемую пассивную систему баланса, имеют переключатели для установки адреса платы. СКУ второго уровня по интерфейсу запрашивает и принимает данные от СКУ первого уровня. СКУ управляет работой коммутатора, выводит информацию на ЖКИ дисплей (напряжение, ток всей АБ) и имеет последовательный интерфейс RS232 для связи с внешними устройствами.

АБ можно заряжать как высоковольтным зарядным устройством (ЗУ) с выходным напряжением 252В, так и шестью низковольтными ЗУ, с напряжением 42В. Это позволяет использовать различные схемы заряда АБ. аккумуляторов. Плата СКУ АБ имеет разъем интерфейса RS232 для передачи данных во внешнюю ЭВМ, а также для приёма команд. Предполагается работа в составе энергоустановки АНПА комплекта из четырех последовательно соединенных батарейных модулей с общим рабочим напряжением 346 В.







Рис.1. а. Опытный образец АБ с рабочим напряжением 220 В и номинальной емкостью 7 Ач. б. Макетный образец АБ с рабочим напряжением 86,5 В и номинальной емкостью 300 Ач.

На рис 16 представлен макетный образец высоковольтного батарейного модуля. Номинальное напряжение 86,5 В. Номинальная емкость 300 Ач. Масса АБ 220 кг. Показатель удельной энергии АБ составляет 120 Втч/кг. В АБ используются литийгельполимерные аккумуляторы с номинальной емкостью 100 Ач соединенные по параллельно-последовательной схеме. СКУ AБ состоит ИЗ платы управления коммутаторами, платы системы управления и плат баланса, а также содержит предохранители, коммутаторы, датчик тока. К СКУ подсоединены платы баланса. К плате СКУ для контроля напряжения подсоединен каждый аккумулятор. Датчики температуры, расположенные на корпусах аккумуляторов используются для измерения температуры. Каждая плата баланса рассчитана на подсоединение четырех последовательно соединенных.

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

В.М. Рулевский, А.Г. Юдинцев

Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (НИИ АЭМ ТУСУР).

634034, Томск, ул. Белинского, 53, тел./факс:(3822) 560059 e-mail: rulevsky@niiaem.tomsk.ru

Рассмотрены системы электропитания современных телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов, позволяющие решать задачи увеличения удельной мощности подводной части и улучшения ее массогабаритных показателей.

Необходимость проведения геологоразведочных, аварийно-спасательных, обзорнопоисковых и других видов работ на морском дне с высокой качественной достоверностью поставила задачу создания и эксплуатации современных подводных технических средств. В наибольшей степени решению этой задачи отвечают телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА), оснащенные различной научно-исследовательской аппаратурой.

Эффективность выполнения различного вида работ на морском дне ТНПА определяется в значительной мере их энергетическим обеспечением, энерговооруженностью, так как использование научно-исследовательской, фотографической и телевизионной аппаратуры на больших глубинах (до 6000 м) требует применения мощных осветительных приборов и устройств со значительным энергопотреблением (до 30-60 кВт), работающих как в длительном, так и в импульсном режимах. Одним из основных путей увеличения удельной мощности подводной части и повышения ее надежности является передача энергии по кабель-тросу на переменном токе повышенной частоты [1].

Целью работы является анализ структур систем электропитания современных телеуправляемых подводных аппаратов, имеющих высокие массогабаритные показатели, надежность и ресурсоэффективность.

Общая схема комплекса телеуправляемого необитаемого подводного аппарата подключенного к сети обеспечивающего судна представлена на рисунке 1.



Рис.1. Общая схема комплекса телеуправляемого необитаемого подводного аппарата 1 – обеспечивающее судно; 2 – кабель-трос; 3 – гараж-заглубитель; 4 – плавучий кабель; 5 – телеуправляемый необитаемый подводный аппарат.

СЭП ТНПА условно состоит из двух частей: системы электропитания бортовой (БЧ) и подводной части (ПЧ). СЭП БЧ расположена на борту обеспечивающего судна, питание которой осуществляется от трехфазной судовой сети, основной или резервной, напряжением 380 В, частотой 50 Гц. Напряжение с выхода СЭП БЧ передается по кабель-тросу на СЭП ПЧ, устанавливаемую на гараже-заглубителе и ТНПА.

В современных системах подводного оборудования с дистанционным управлением используется в качестве составной части гараж-заглубитель, в котором может размещаться ТНПА при его доставке на глубину, и с которым подводный аппарат может соединяться относительно коротким и легким плавучим кабелем [2]. Гараж-заглубитель позволяет установить на нем часть блоков системы электропитания и управления, при этом освобождается дополнительное, полезное пространство на ТНПА и снижается его вес.

На рисунке 2 представлена СЭП ТНПА переменного тока с передачей энергии по кабель-тросу трехфазным напряжением с частотой 50 Гц и трехфазным напряжением с частотой 1000 Гц по плавучему кабелю. Система электропитания содержит установленную на судне-носителе бортовую часть системы, включающую коммутатор сети К, вход которого соединен с судовой электрической сетью – основной или резервной, напряжением 380 В частотой 50 Гц. Выход коммутатора сети К соединен с фильтром радиопомех ФРП и силовым повышающим трансформатором Тр, который повышает напряжение сети до $U_{Лэф\phi}$ =1000÷1500 В.



Рис. 2. Система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу трехфазным напряжением с частотой 50 Гц и трехфазным напряжением с частотой 1000 Гц по плавучему кабелю

Повышенное трехфазное напряжение с частотой 50 Гц по кабель-тросу поступает на первый подводный блок системы, установленный на гараже-заглубителе. Первый подводный блок системы содержит управляемый выпрямитель УВ_{Г3} с фильтром $\Phi_{\Gamma3}$, выход которого соединен с инвертором АИ_{Г3}, повышающим частоту питающего напряжения до 1000 Гц. Напряжение повышенной частоты с выхода АИ_{Г3} подается на согласующий трансформатор Тр_{Г3}, обеспечивающий питание устройств гаража-заглубителя, а также по плавучему кабелю на согласующий трансформатор Тр_{ТНПА} второго подводного блока системы, установленного на подводном аппарате.

Достоинством данной СЭП ТНПА является то что, за счет повышения частоты питающего напряжения до 1000 Гц существенно снижаются массогабаритные параметры трансформатора Тр_{тнпа} в 2,5-3 раза по сравнению с трансформатором, работающим на промышленной частоте 50 Гц. В случае расположения трансформатора Тр_{тнпа} в прочном корпусе с масленым охлаждением обеспечивается дополнительное уменьшение габаритов трансформатора, а также разгрузка стенок прочного корпуса от давления воды, что позволяет уменьшить толщину стенок прочного корпуса и соответственно уменьшить массу СЭП устанавливаемую на ТНПА еще в 1,3-1,5 раза [3].

Недостатками рассмотренной СЭП ТНПА являются низкие массогабаритные характеристики гаража-заглубителя, так как трансформатор $Tp_{\Gamma 3}$ работает на переменном напряжении с частотой 50 Гц, а также усложнение системы электропитания ПЧ за счет двойного преобразования энергии – переменного в постоянное и постоянного в переменное повышенной частоты.

В СЭП ТНПА переменного тока с передачей энергии по кабель-тросу трехфазным напряжением U_{Лэфф}=1000÷1500 В частотой 50 Гц и постоянным напряжением по плавучему кабелю представленная на рисунке 3 отсутствуют некоторые недостатки схемы СЭП ТНПА изображенной на рисунке 2.



Рис.3. Система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу трехфазным напряжением U_{Лэфф}=1000÷1500 В частотой 50 Гц и постоянным напряжением по плавучему кабелю

Основным достоинством данной системы является простота и высокие массогабаритные показатели подводного аппарата, за счет того что, по плавучему кабелю передается постоянное напряжение и отсутствует трансформатор, что создает возможность установки дополнительного оборудования на телеуправляемом подводном аппарате.

Недостатками представленной СЭП ТНПА (рис.3) являются низкие массогабаритные характеристики гаража-заглубителя, так как трансформатор $Tp_{\Gamma 3}$ работает на переменном напряжении с частотой 50 Гц, а также применение управляемых выпрямителей $YB1_{\Gamma 3}$ и $YB2_{\Gamma 3}$ с системой управления для обеспечения стабильного постоянного напряжения 300 В и 600 В для нагрузок гаража-заглубителя и ТНПА.

На рисунке 4 приведена СЭП ТНПА с судна-носителя, которая позволяет улучшить массогабаритные показатели подводной части системы за счет передачи энергии по кабельтросу постоянным напряжением, а по плавучему кабелю переменным повышенной частоты.



Рис.4. Система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу постоянным напряжением и трехфазным переменным напряжением с частотой 1000 Гц по плавучему кабелю

В этом случае, как и в варианте СЭП ТНПА (рис.2), за счет повышенной частоты, существенно снижаются массогабаритные параметры трансформатора, установленного на ТНПА, а также за счет передачи по кабель-тросу постоянного напряжения, обеспечиваются более низкие потери мощности в кабель-тросе.

В настояшее время, наилучшим требованиям, образом, отвечаюшая всем предъявляемым СЭП ΤΗΠΑ. электропитания к современным является система телеуправляемого необитаемого подводного аппарата представленная на рисунке 5.

Бортовая часть СЭП ТНПА содержит коммутатор сети К, вход которого соединен с судовой сетью. С коммутатора К напряжение через фильтр радиопомех ФРП поступает на выпрямитель В, затем через фильтр Ф на трехфазный автономный инвертор АИ, который повышает частоту питающего напряжения до 1000 Гц. Выход инвертора АИ соединен с первичными обмотками повышающего трехфазного трансформатора Тр, который в свою очередь повышает напряжение до величины $U_{Лэф\phi}=1000\div1500$ В, а вторичные обмотки которого соединены с кабель-тросом, связанным с первичными обмотками трансформатора Тр_{г3} подводной части установленной на гараже-заглубителе и плавучим кабелем.



Рис. 5. Система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу переменным напряжением повышенной частоты

Вторичные обмотки согласующего трансформатора $Tp_{\Gamma 3}$ соединены с выпрямителями $B_{\Gamma 3-600}$ и $B_{\Gamma 3-300}$, формирующими питающие напряжения для гаража-заглубителя 600 и 300 В. С выхода плавучего кабеля напряжение поступает на первичные обмотки согласующего трансформатора $Tp_{TH\Pi A}$, расположенного на телеуправляемом необитаемом подводном аппарате. Вторичные обмотки согласующего трансформатора $Tp_{TH\Pi A}$ соединены с выпрямителями $B_{TH\Pi A-600}$ и $B_{TH\Pi A-300}$, формирующими питающие напряжения для ТНПА 600 и 300 В.

Достоинствами данной системы являются: высокие массогабаритные показатели трансформатора $Tp_{\Gamma 3}$ первой подводной части системы, установленной на гаражезаглубителе и трансформатора $Tp_{TH\Pi A}$ подводного аппарата за счет повышения частоты питающего напряжения инвертором АИ до 1000 Гц; простота и надежность системы электропитания подводной части.

В НИИ АЭМ ТУСУР на базе предложенной и разработанной структурной схемы, представленной на рисунке 5, были разработаны системы электропитания ТНПА мощностью 10 кВт, 30 кВт и 60 кВт. На рисунке 6 представлены фотографии СЭП ТНПА мощностью 30 кВт, а в таблице 1 отображены основные технические характеристики данной системы.



Рис. 6. Система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата мощностью 30 кВт: 1 – бортовая часть системы электропитания; 2 – пульт дистанционного управления; 3 – система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата; 4 – система электропитания гаража-заглубителя

№ п.п.	Параметр	Значение	
1	Электрические		
	Напряжение питания / частота	380 В, 50 Гц	
	Максимальная длина кабель-троса	8000 м	
	Выходная мощность СЭП ТНПА	25000 Вт	
	Выходная мощность СЭП ГЗ	5000 Вт	
	Предельное отклонение выходного напряжения	± 10 %	
	Коэффициент пульсаций выходного напряжения	не более 0,5 %	
2	Эксплуатационные		
	Режим работы	автономно/дистанционно	
	Переход на резервную сеть	автоматически	
		а) напряжение;	
	Измерение параметров:	б) ток;	
		в) сопротивление изоляции;	
		г) температуру.	
		а) пропадание сети;	
		б) снижение уровня сети ниже	
		допустимого;	
	Диагностика аварийных состояний:	в) обрыв фаз сети;	
		г) обрыв/отсутствие кабеля	
		заземления;	
		д) срабатывание термозащиты;	
		е) срабатывание защит от	
		превышения допустимых	
		значений токов и напряжений.	
		ж) пропадание сети Ethernet.	
	_	запись данных каждые 10	
	Протоколирование данных	секунд и по изменению	
		состояния	

Таблица 1. Технические характеристики системы электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата мощностью 30 кВт.

Выводы

1. Проведенный анализ структур построения современных СЭП ТНПА показал, что в настоящее время для выполнения геологических, научно-исследовательских и спасательных работ на предельных глубинах до 6000 м необходимо использовать СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу переменным напряжением повышенной частоты (рис.5).

2. Реализованная структурная схема СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу переменным напряжением повышенной частоты (рис.6), обеспечивает стабилизацию напряжения на нагрузках ТНПА и отвечает основным требованиям, предъявляемым к СЭП ТНПА по величине передаваемой мощности при высоких массогабаритных показателях.

Литература

1. Подводные аппараты для геологических исследований / Под. ред. А.М. Игнатова – Геленджик: ПО «Южморгеология», 1990. – 92 с.

2. Ястребов В.С. Телеуправляемые подводные аппараты. – Л.: Судостроение, 1985. – 232 с.

3. Рулевский В.М., Дементьев Ю.Н., Бубнов О.В. Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов / / Известия. – 2004. – № 5. – Т. 307. – С. 120 – 123.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ СОЗДАНИЯ МОРСКИХ ВОЛНОВЕТРОСОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ С ВОДОРОДНЫМ ЦИКЛОМ

В.С. Блинцов, С.А. Кудря, Ю.М. Запорожец, Ж.Ю. Бурунина

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова 54025, Украина, г. Николаев, проспект Героев Сталинграда, 9, тел.: +38(0512) 431174, email: vblintsov@mail.ru

Институт возобновляемой энергетики НАН Украины 02094, Украина, г. Киев, улица Красногвардейская, 20-а, офис 202, тел.: +38(067) 135-5314, email: umz-286@bigmir.net

Изложены основные положения концепции создания волноветросолнечных энерготехнологических комплексов с водородным циклом на украинской части Азово-Черноморского бассейна. Сформулированы четыре основные группы научно-технических задач, решение которых позволит практическую реализацию предложенной концепции.

Темпы наращивания мощностей оффшорной ветроэнергетики в североевропейских странах вызвали тенденцию к ее продвижению из прибрежной мелководной зоны в открытое морское пространство на большие глубины, где интенсивность ветровых потоков существенно выше [1]. Это направление развития энергетики делает актуальной задачу создания морских энергетических платформ специальной конструкции, которые имели бы возможность устанавливаться на энергетически перспективных акваториях и содержать одновременно три основных вида преобразователей энергетики является поиск эффективных способов передачи полученной в море энергии (как правило, электроэнергии) к береговым потребителям.

Одним из наиболее перспективных путей совместного использования ветровых, волновых и солнечных ресурсов открытого моря считается создание волноветросолнечных энерготехнологических комплексов с водородным циклом (ВВСЕТК-ВЦ) [2-7]. Воплощение такого проекта требует систематизации научных и научно-технических задач, которые неизбежно встанут перед его разработчиками. Для этого необходимо выработать рациональные подходы к их решению на основе системного подхода и современных достижений проектного менеджмента. Авторы определяют целевую установку проекта создания ВВСЕТК ВЦ в следующей формулировке:

создание в акваториях украинской части шельфа Черного и Азовского морей волноветросолнечных энергетических комплексов с водородным циклом на плавучих морских платформах (ПЭП), связанных с береговой промышленно-транспортной инфраструктурой надежными коммуникациями и обеспечивающих конкурентные экономические показатели использования производимой продукции в соответствующем секторе рынка энергообеспечения и технологического сырья.

Таким образом, главные функции ВВСЕТК-ВЦ состоят в том, чтобы:

- обеспечивать регулярный режим преобразования энергии волн, ветра и солнечного излучения в электрическую энергию в месте дислокации ПЭП;

- обеспечивать осуществление процесса электролиза воды, потребляемой из прилегающей к платформе акватории, получение водорода и его краткосрочное хранение до отправки на береговые приемные терминалы;

- обеспечивать плавучесть, непотопляемость, живучесть и управляемость платформы со всем оснащением и экипажем (вахтой) как в условиях штатных волновых и ветровых нагрузок, так и в любых критических ситуациях, вызванных действием внешних природных факторов;

- обеспечивать возможность выполнения операций по буксировке ПЭП, ее перестановок в пределах отведенной акватории, позиционирования относительно направлений природных энергетических потоков и удержания в месте дислокации;

- обеспечивать условия для осуществления погрузочно-разгрузочных операций с емкостями для транспортировки водорода и прочими грузами, доставки расходуемых материалов и средств жизнеобеспечения, швартовки судов транспортного и вспомогательного флота, а также проведения ремонтно-профилактических работ.

Исполнение указанных функций осуществляют соответствующие им подсистемы ПЭП:

- несущая платформа (НП), которая является плавучим сооружением, подпадающим под признаки и отвечающим требованиям, установленным международными классификационными обществами;

- волноветросолнечный энергетический комплекс (ВВСЭК), включающий в себя ветроэлектрическую станцию (ВЭС) из нескольких ветроагрегатов, волновую электростанцию (ВлЭС) из нескольких волновых энергодобывающих модулей и фотоэлектрическую станцию (ФЭС) из нескольких секций (блоков), подсоединенных к общей производственной электроэнергетической системе (ПЭЭС), электростанцию собственных нужд (ЭСН) с аккумуляторной секцией (АС);

- электролизно-водородный комплекс (ЭВК), включающий в себя комплектно поставляемые электролизные установки, количество которых предопределено заданной производительностью ВВСЕТК-ВЦ по водороду, системы водоподготовки и приготовления электролита, продувки аппаратов, ресиверов и трубопроводов инертным газом (азотом), запасы которого хранятся на платформе в ресиверах азота, а также систему закачки водорода в транспортные емкости;

- комплекс якорно-швартовных, подруливающих и других механизмов (ЯШК), объединенных общим алгоритмом управления во взаимосвязи с системой управления режимами энергетического комплекса;

- причально-грузовой комплекс, включающий подъемные механизмы, лифты и другие необходимые механизмы, приспособления и оснастку.

Рассмотрим теперь специфические особенности реализации функций каждой из обозначенных подсистем. К наиболее существенным группам задач, требующим приоритетного рассмотрения, отнесем:

общепроектные задачи, связанные с определением основных размерений, водоизмещения и архитектуры ВВСЕТК-ВЦ, обеспечением необходимой грузоподъемности и остойчивости ее НП с учетом массогабаритных характеристик основного производственнотехнологического оборудования И ограничений, накладываемых условиями его минимально функционирования (в частности, допустимое расстояние между волноветроагрегатами, требованиями к расположению элементов ФЭС и пр.);

- создание систем ручного, автоматизированного и автоматического управления процессом выработки электроэнергии и процессом производства водорода на базе оборудования ВВСЕТК-ВЦ;

- создание высокоэффективных систем управления плавучей энергетической платформой как морским подвижным объектом в основных режимах: буксировки (или самостоятельного движения), позиционирования в заданной точке морской акватории и адаптации к потокам природных энергоносителей (эволюции за солнечным меридианом и розой ветров);

- создание научных основ строительства ВВСЕТК-ВЦ – разработка новых научно обоснованных технологий строительства НП (в том числе – из композитных материалов), сборки и монтажа уникального силового энергетического оборудования, создание

современных методов управления проектами строительства наукоемких объектов морской энергетики.

В первой группе задач особую важность составляют задачи обеспечения прочности композитных и сварных конструкций НП в условиях комбинированного воздействия ветроволновых и ледовых нагрузок на ее корпус, ветрового давления на ветроколеса, колебаний башен ВЭУ и вибраций их фундаментов, особенно в диапазоне собственных частот, в сочетании с держащими свойствами якорных связей. Решению этих и других задач должны предшествовать: формирование перечня режимов их функционирования в условиях нестационарности внешних воздействий и неопределенности собственных параметров; анализ особенностей эксплуатации в квазистационарных и динамических режимах ВВСЕТК-ВЦ; разработка научно обоснованных методов проектирования НП и создание методик их макетирования и проведения бассейновых и натурных морских испытаний. Эта группа работ относится к теории и проектированию ВВСЕТК-ВЦ как морского объекта, обеспечивает создание теоретического фундамента для разработки нового вида морской техники и должна охватывать все основные теоретические вопросы ее создания – от уравнений существования до уточнений правил классификации и постройки. Украинское судостроение имеет успешный опыт комплексного подхода к созданию универсальных транспортных судов и средств океанотехники [8], что позволяет надеяться на успешное решение и рассматриваемой задачи создания волноветросолнечных энергетических комплексов с водородным циклом, размещенных на плавучих морских платформах.

Во второй группе задач перспективными являются подходы современной теории автоматического управления, сочетающие традиционные и хорошо зарекомендовавшие себя технические решения по управлению энергетическим оборудованием большой мощности с новыми техническими решениями в области автоматики на основе применения теории искусственного интеллекта [9, 10]. Перспективным представляется трехуровневой системы управления ВВСЕТК-ВЦ - оперативный, тактический и стратегический. Каждый из этих уровней реализуется в разных временных интервалах.

К главным задачам оперативного уровня управления относятся: управление режимами работы ВВСЕТК-ВЦ при генерации электрической энергии и ее потреблении электролизерами; управление процессами добывания, хранения и выгрузки произведенного водорода на судно-газовоз; управление вспомогательным оборудованием ВВСЕТК-ВЦ, которое обеспечивает проектное функционирование основного ее энергооборудования. Главной целью оперативного управления ВВСЕТК-ВЦ является автоматическое обеспечение баланса сгенерированной электроэнергии и произведенного водорода, а также контроль за процессами хранения водорода (сжатие, ожижение) и его выгрузка на судно-газовоз при обеспечении безаварийности и заданной надежности функционирования.

К главным задачам тактического уровня управления ВВСЕТК-ВЦ относятся: обеспечение оптимальных показателей функционирования ВВСЕТК-ВЦ по заданной системой критериев оценки эффективности; адаптация режимов работы ВВСЕТК-ВЦ к текущим гидрометеорологическим условиям эксплуатации; расчеты статической и динамической стойкости, надежности работы оборудования ВВСЕТК-ВЦ; настройка системы управления ВВСЕТК-ВЦ на основные, вспомогательные и предельные (аварийные) режимы работы в соответствии с текущей ситуацией и задачами стратегического уровня управления.

К главным задачам стратегического уровня управления ВВСЕТК-ВЦ относятся: оптимизация режимов работы ВВСЕТК-ВЦ для среднесрочного и долгосрочного периодов эксплуатации; оптимизация использования энергетических ресурсов ВВСЕТК-ВЦ с учетом текущего и капитального ремонтов оборудования; прогнозирование объемов произведенной электрической энергии и полученного водорода; количественная оценка коммерческой эффективности функционирования ВВСЕТК-ВЦ.

Создание высокоэффективных систем управления ВВСЕТК-ВЦ как морским подвижным объектом выполняется по критерию максимальной энергетической

эффективности ВВСЕТК-ВЦ. Исполнительными механизмами при этом являются: приводы ЯШК; приводы балластных насосов и подруливающих устройств; приводы поворота батарей фотоэлементов и ветряков, системы пространственной адаптации ВлЭС.

Предварительный анализ показывает, что управление пространственным положением НП морского комплекса является нетривиальной задачей, техническая реализация которой требует разработки концепции автоматического управления в условиях неопределенности с последующим синтезом адаптивных регуляторов. Опыт авторов в разработке и практическом применении систем адаптивного управления другими морскими объектами (судами, подводными аппаратами) свидетельствует о перспективности автоматизации управления пространственным положением НП и BBCETK-BЦ в целом на основе применения элементов искусственного интеллекта [11].

Что же касается создания научных основ строительства ВВСЕТК-ВЦ, то в этом направлении украинская судостроительная наука также имеет существенные заделы, которые образуют прочный научный и производственный фундамент для серийного строительства ВВСЕТК-ВЦ в Украине [12-14].

Электролизно-водородный комплекс представляется, пожалуй, самым сложным объектом с точки зрения возможностей улучшения его технико-экономической эффективности в составе рассматриваемой системы. Главным барьером в этом плане является соотношение удельных затрат электрической энергии, имеющих физически обусловленный нижний предел, и ее стоимостной оценки через интегральный показатель окупаемости капитальных вложений (инвестиций).

Тем не менее, руководствуясь данными [15, 16], можно заключить, что для наиболее эффективных из предлагаемых на рынке щелочных электролизных установок класса производительности порядка 500 нм³(H₂)/ч (42 кг/ч) с удельным расходом энергии на уровне 4,0 кВт·ч/нм³ H₂, современная стоимость которых (2009 г.) оценивается в 850 \$/кВт установленной мощности, удельные капитальные затраты на единицу производительности по водороду составят 3400 \$, а капиталоемкость установки (фактически его полная цена) – 1,7 млн. \$.

Полагая, что себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии, выработанной на ПЭП, не превысит величину 0,05 \$/кВт·ч, получим энергетическую составляющую себестоимости водорода на уровне 0,2 \$/нм³. Так как, согласно [16], для установок выбранного класса производительности соотношение между операционными (на электроэнергию) и инвестиционными (капитальными) расходами составляет примерно (70:30)%, можно оценить полную себестоимость водорода в указанных условиях величиной 0,285 \$/нм³.

Заложенная в нее составляющая 0,085 \$/нм³ обеспечивает возвратность капитальных вложений в сумме 3400 \$ за 40000 часов работы электролизера; считая в году с учетом необходимых перерывов и простоев 7000 продуктивных часов (при круглосуточной работе) определим срок его окупаемости в 5,5 лет.

Добавив к указанной сумме 5% для покрытия затрат на транспортировку водорода до береговых терминалов и НДС, получим отпускную цену водорода 0,35 \$/нм³.

Если теперь сопоставить затраты на получение 1 тонны аммиака из чистого водорода и природного газа по его нынешней цене, то получим: по водороду – 2000 $\text{hm}^3 \times 0,35 \text{ }/\text{hm}^3 = 700 \text{ }$; по природному газу – 1000 $\text{hm}^3 \times 0,41 \text{ }/\text{hm}^3 = 410 \text{ }$.

Как видно, величины оказываются сопоставимыми. Учитывая тенденцию к снижению стоимости электролизеров до уровня 600 и даже 400 \$/кВт установленной мощности [16], можно рассчитывать на достижение водородом в ближайшие 2-3 года вполне конкурентных позиций в этом секторе.

В целом, представляется достижимой отпускная цена водорода на уровне до 0,15 \$/нм³, и тогда в производстве аммиака замещение водородом природного газа в соотношении 300 \$ против 410 \$ на 1 т NH₃ уже ни у кого не вызовет сомнений в целесообразности развития технологий преобразования энергии возобновляемых источников, в первую очередь, ветровой и солнечной, в товарный водород.

Литература

1. Оффшорные ветряные электростанции: обзор /

http://www.renewable.com.ua/windenergy/40-offshornye-vetrjanye-elektrostantsii-obzor.html

2. Неисчерпаемая энергия. Кн. 4. Ветроводородная енергетика / В.И.Кривцова, А.М. Олейников, А.И.Яковлев. – Харьков: Нац. Аэро-космич. ун-т "Харьк. Авиац. ин-т", 2007. – 600 с.

3. Енергоефективність та відновлювані джерела енергії / Під заг. ред. А.К.Шидловського. – К.: Українські енциклопедичні знання, 2007. – 560 с.

4. Прохоров И.Ю., Акимов Г.Я. Фотоэнергетика и водородная энергетика: возможности и достижения // Наука та інновації. 2009, т.5, № 6, С.11-24

5. Андреев В.М., Забродский А. Г., Когновицкий С.О. Интегрированная солнечноветровая энергетическая установка с накопителем энергии на основе водородного цикла // Альтернативная энергетика и экология. – ISJAEE. 2007, № 2, С. 99 – 105.

6. Блінцов В.С., Запорожець Ю.М., Буруніна Ж.Ю., Куценко П.С. Попередня оцінка основних характеристик морської воднедобувної платформи. – Електронне видання «Вісник Національного університету кораблебудування». – Миколаїв: НУК. – 2011. – №4.

7. Запорожец Ю.М., Кудря С.А., Блинцов В.С. Научно-технические задачи по созданию морских ветросолнечных энергетических комплексов с водородным циклом на украинском шельфе. // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология», 2012. – №5/6. – С. 88-97

8. Створення універсальних транспортних суден і засобів океанотехніки: Монографія / С.С. Рижков, В.С. Блінцов, Г.В. Єгоров, Ю.Д. Жуков, В.Ф. Квасницький, К.В. Кошкін, І.В. Крівцун, В.О. Нєкрасов, В.В. Севрюков, Ю.В. Солоніченко; за ред. С.С. Рижкова. – Миколаїв: Видавниц. НУК, 2011. – 340 с.

9. Интеллектуальные системы в морских исследованиях и технологиях / Под ред. Ю. И. Нечаева. – Санкт-Петербург: ГМТУ, 2001. – 395 с.

10. Блінцов В.С., Буруніна Ж.Ю., Клименко П.Г., Куценко П.С. Сучасні задачі керування морськими воднедобувними платформами. // Матеріали четвертої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті». – Том 1. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2012. – С. 77-80.

11. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. – К.: "Радиоаматор", 2008. – 972 с.

12. Проектирование, технология и организация строительства композитных плавучих доков / [А.С. Рашковский и др.]; под наук. ред. А.С. Рашковского : Монография. – Николаев : НУК : РАЛ-полиграфия, 2008 – 614 с.

13. Механизмы управления проектами и программами регионального и отраслевого развития: Монография / В.Н. Бурков, В.С. Блинцов, А.М. Возный, К.В. Кошкин, К.М. Михайлов, Ю.Н. Харитонов, С.К. Чернов, А.Н. Шамрай. – Николаев: Видавництво Торубари О.С., 2010. – 176 с.

14. Управління інноваційною діяльністю підприємств та організацій морегосподарського комплексу: монографія / С. І. Бай, В. С. Блінцов, С. Д. Бушуєв та ін. – Миколаїв: видавець Торубара О. С., 2013. – 448 с.

15. Марченко О.В., Соломин С.В. Анализ эффективности производства водорода с применением ветроэнергетических установок и его использования в автономной энергостистеме //Альтернативная энергетика и экология. – ISJAEE. 2007. – № 3. – С. 112 – 118.

16. Genevieve Saur. Wind-to-hydrogen project: electrolyzer capital cost study // Technical Report NREL/TP-550-44103. – National Renewable Energy Laboratory. Golden, – Colorado, USA. – 2008, December. – 48 PP. // Режим доступу: http://www.nrel.gov/hydrogen/pdfs/44103.pdf

Д.Н. Михайлов, Н.А. Найденко, А.А. Борейко

Институт проблем морских технологий ДВО РАН. 690950, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел/факс: (423) 243-24-16, e-mail: denmih@marine.febras.ru

В докладе рассмотрены вопросы разработки и испытаний систем энергообеспечения (СЭО) автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) разработки ИПМТ ДВО РАН. Обоснован выбор аккумуляторных батарей. Описана разработка устройства коммутации и управления АБ на примере СЭО АНПА «МТ-2013». Приведены сравнительные характеристики и результаты испытаний этих систем.

Введение

На этапе технического проектирования АНПА традиционным вопросом является выбор энергоисточника и устройства коммутации и управления СЭО с учетом конкретных тактикотехнических требований (автономность, максимальная скорость хода, глубина погружения и т.д.). Оптимальный выбор этих систем повышает эксплуатационные характеристики АНПА.

Выбор аккумуляторных батарей

Наиболее перспективными источниками энергии для СЭО АНПА являются литийионные аккумуляторные батареи (АБ) (рисунок 1), обладающие наилучшими массогабаритными характеристиками (до 180 Вт•ч/кг), длительным сроком службы (более 500 циклов разряд-заряд), отсутствием газовыделения, большим током разряда и заряда [1].



Рис. 1. Удельные мощность и энергия аккумуляторов различных электрохимических систем

В СЭО АНПА Клавесин-1Р и МТ-2013 использованы литий-ионные аккумуляторы ЛИКГП-130С и ЛИКГП-150С производства ОАО «Ригель», на аппарате «МТ-2013» установлены элементы PL-1055275-2С разработки АА Portable Power Corp. (США). Аккумуляторы PL-1055275-2С обладают лучшими характеристиками (таблица 1) по сравнению с ЛИКГП, но также меньшей механической прочностью из-за мягкого материала внешней оболочки. В связи с этим для аппаратов военного назначения целесообразней выбирать более прочный аккумулятор.

Таблица 1.	Характе	ристики акк	умулято	ров использ	уемых в АНП	А ИПМТ ДВО РАН
------------	---------	-------------	---------	-------------	-------------	----------------

Наименование	ЛИКГП-130С	ЛИКГП-150С	PL-1055275-2C
Номинальная емкость, А·ч	130	150	21
Удельная энергия, Вт*ч/кг	120	140	164
Максимальный ток разряда, А	260	300	21
Максимальный ток заряда, А	65	75	21
Удельная стоимость,	5,85	6,75	17,64
Габаритные размеры элемента,	210×133×67	213×133×67	275×55×10,5
Диапазон рабочих температур, °С	-20+50	-30+50	-20+50
Масса элемента, кг	4,1	4,5	0,4

Разработка устройства коммутации и управления АБ

Оптимальное построение устройства коммутации и управления повышает безопасность и эксплуатационные характеристики АБ. Схемы контроля могут быть построены либо на основе специализированных интегральных микросхем, либо на элементной базе общего назначения.

В качестве примера построения устройства коммутации и управления на рисунке 3 представлена структурная схема модуля АБ АНПА МТ-2013.



Рис. 3. Структурная схема модуля АБ АНПА МТ-2013

СЭО АНПА имеет несколько режимов работы. В штатном режиме разряда СЭО обеспечивает независимое питание следующих потребителей:

-основной потребитель - движительно-рулевой комплекс;

-дополнительные мощные потребители (н.р.: источник питания импульсного светильника, интерферометрический гидролокатор бокового обзора и т.д.);

-основная система (бортовой компьютер, система технического зрения, устройства навигации и т.д.);

-контроллер аварийной системы, питающий блок гидроакустической навигационной системы, радиомодем, приемник GPS, проблесковый маяк.

В аварийном режиме (полный разряд группы АБ, обрыв цепи питания, КЗ и т.п.) осуществляется питание только систем поиска, работающих под управлением контроллера аварийной системы.

В режиме заряда СЭО обеспечивает штатный заряд АБ или заряд ограниченным током при сверхнизком напряжении на одном из элементов АБ.

В режиме базирования питание АНПА осуществляется от внешнего источника питания.

В таблице 2 представлены сравнительные характеристики СЭО АНПА последних разработок ИПМТ ДВО РАН. Внешний вид модулей АБ показан на рисунке 4.



В

Рис. 4. Внешний вид модулей АБ АНПА: а) – МТ-2010; б) – Клавесин-1Р; в) – МТ-2013.

В СЭО АНПА MT-2013 использованы два независимых контроллера для управления АБ и силовыми ключами.

Контроллер АБ представляет собой специализированную интегральную микросхему BQ78PL114, которая работает в автономном режиме независимо от системы управления и обеспечивает измерение и контроль основных параметров АБ, а также активное выравнивание заряда аккумуляторов методом перераспределения заряда по технологии PowerPump (макс. ток балансировки 1А). Данный метод выравнивания учитывает состояние заряда батареи (СЗБ), а не напряжение на аккумуляторе, что улучшает характеристики АБ [2].

Контроллер силовых ключей организован на базе микроконтроллера AT90CAN128 и выполняет функции управления силовыми ключами и их защиту, а также информационный обмен с управляющей ЭВМ через оптоизолированную линию связи CAN.

В СЭО использованы интеллектуальные силовые ключи, построенные на базе Nканальных транзисторов MOSFET с низким сопротивлением канала, микросхемдрайверов с аппаратным обнаружением КЗ в нагрузке, датчика тока на основе эффекта холла и предварительным ключом, ограничивающим ток включения. Данная схема позволяет производить плавное включение нагрузки с любой емкостью, измерение тока потребления с защитой от его превышения и КЗ.

Наименование	Клавесин-1Р	MT-2010	MT-2013
Номинальная емкость АБ, А·ч	260	42	150
Количество АБ	4	3	2
Максимальное напряжение АБ, В	29,4	29,4	50,4
Максимальный ток разряда, А	60	30	100
Максимальный ток заряда, А	75	15	40
Количество элементов в АБ	2x7	2x7	12
Диапазон рабочих температур, °С	-20+50	-20+50	-20+50
Принцип разряда групп АБ	Поочередно	Поочередно/ одновременно	Поочередно/ одновременно
Принцип заряда групп АБ	Одновременно	Одновременно	Одновременно
Дополнительные силовые ключи	Нет	Нет	2x10A
Питание аварийной системы	Напрямую с АБ	После ключа разряда	Специальный канал питания
Ограничение тока предзаряда	Нет	Да, в блоке	Да, в СЭО
Ток потребления в режиме	70	5	0,1
Метод выравнивания АБ	Активный по напряжению	Пассивный по напряжению	перераспределе-ние заряда по СЗБ
Ток выравнивания напряжений АБ,	0,6	0,2	1
Аппаратный расчет емкости батареи	Нет	Да, по току разряда/заряда	Да, по внутреннему сопротивлению
Точность измерения токов заряда и разряда	<u>+</u> 160мА	<u>+</u> 10 мА	<u>+</u> 10 мА
Точность измерения напряжения каждого аккумулятора	<u>+</u> 50мВ	<u>+</u> 10 мВ	<u>+</u> 5 мВ
Контроль температуры каждого аккумулятора АБ (точность)	Да (<u>+</u> 1°C)	Нет, только группы	Да (<u>+</u> 1°C)
Информационная линия связи	RS-232	CAN	Изолирован. САМ
Контроль температуры силовых ключей	Разряд и система	Только ДРК	Разряд, заряд и ДРК
Дополнительный контроль токов силовых ключей	Нет	Только ДРК на КЗ	Да, с измерением (<u>+</u> 100 мА)
Обратная связь по включению	Дa	Нет	Да
Аппаратное отключение АБ от нагрузки в конце разряда	Да	Дa	Да
Аппаратное отключение АБ от ЗУ в конце заряда	Нет	Да	Да
Аппаратное отключение АБ от нагрузки при КЗ	Да	Дa	Да

Таблица 2. Сравнительные характеристики СЭО последних АНПА ИПМТ ДВО РАН

Применение транзисторов в качестве силовых ключей обосновано отсутствием недостатков реле: габариты, малая скорость работы, ограниченный электрический и механический ресурс, радиопомехи при замыкании и размыкании контактов и проблемы при коммутации индуктивных нагрузок [3]. Благодаря применению групп параллельно соединенных транзисторов удалось достичь низких падений напряжений на ключах (разряд

100А~100мВ, заряд+ИД 30А~80мВ, ДРК+ИД 100А~200мВ, ИГБО+ИД и ИПИС+ИД 10А~100мВ), а наличие идеальных диодов (ИД) по выходу всех ключей позволяет параллельно объединять несколько модулей АБ.

Лабораторные испытания СЭО

Для подтверждения расчетных характеристик, работы схем выравнивания и защиты были проведены лабораторные испытания СЭО. Разряд аккумуляторов осуществлялся через электронную нагрузку типа UNICORN SHH-2.4K. Для заряда использовались источники питания типа Lambda GEN.







Рисунок 6 – Графики напряжений и токов на АБ СЭО МТ-2010 при разряде током 20А (а) и заряде током 15А (б)

В результате испытаний были получены характеристики АБ превосходящие их номинальные параметры (Емкость модуля АБ МТ-2013 = 175А·ч, МТ-2010 = 44,2А·ч) (рисунки 5, 6), что свидетельствует о правильной работе схем выравнивания заряда АБ.

Проверка схем контроля и защиты АБ, также подтвердила их работоспособность.

Полученная в результате испытаний энергоемкость АБ $E_{a\delta}$, позволяет более точно вычислить время максимальной автономности аппарата в часах T_a при заданной скорости V_x и дальности D_a хода по формуле [4]:

$$T_{a} = \frac{D_{a} \cdot 1000}{V_{x} \cdot 3600} = \frac{E_{a\delta}}{\left(\frac{C_{x} \cdot \rho \cdot V_{x}^{3} \cdot U^{2/3}}{2 \cdot \eta_{a\beta} \cdot \eta_{an}} + N_{P\mathcal{A}}\right)}, \quad (1)$$

где: C_x – коэффициентом сопротивления корпуса, ρ – плотность воды, U – водоизмещение аппарата, η_{26} – КПД гребного винта, η_{3n} – КПД гребного электропривода, N_{P3A} – мощность, потребляемая системами аппарата.

Выводы

• Наиболее перспективными источниками энергии для АНПА являются литий-ионные аккумуляторные батареи. Для использования в АНПА военного назначения наибольшей интерес представляют аккумуляторы ЛИКГП-150С производства ОАО «Ригель».

• СЭО, разработанные в ИПМТ ДВО РАН позволяют повысить надежность, ресурс и эксплуатационные характеристики АНПА, благодаря использованию специализированных интегральных микросхем для измерения и контроля основных параметров, а также выравнивания заряда АБ.

•Лабораторные испытания СЭО подтверждаю их характеристики, правильность принятых при их проектировании технических решений, а также позволяют уточнить автономность АНПА.

Литература

1. Ю.А. Быстров, Н.А. Кудрявцев, А.В. Краснобрыжий, М.М. Логинова, В.В. Жданов. Разработка литий-ионных аккумуляторов и батарей с высокими удельными характеристиками для применения в морских объектах различного назначения. Владивосток: Подводные исследования и робототехника. 2007. № 2(4), стр.34-37.

2. Сихуа Уэн. Выравнивание заряда батарей обеспечивает долгое время работы и продлевает срок службы. WWW.TI.COM/AAJ. Журнал по применению аналоговых компонентов. 1 квартал 2009, стр.11-14.

3. Davide Andrea. Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs. Artech House: ISBN 1608071049, 2010 Γ .

4. Костенко В.В., Михайлов Д.Н. Определение параметров энергосиловой установки автономного необитаемого подводного аппарата по заданной дальности хода. // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013 г. - №3 (140) – С.70 – 73.

УПРАВЛЕНИЕ ИНВЕРТОРОМ В СИСТЕМЕ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

В.А. Герасимов, А.Ю. Филоженко, П.И. Чепурин

Институт проблем морских технологий ДВО РАН 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел (423) 2432416 e-mail: gerasimov@marine.febras.ru

В докладе рассматриваются различные способы формирования сигналов управления автономным инвертором, обеспечивающие изменение выходной мощности путем вариации коэффициента заполнения, даются рекомендации по выбору предпочтительного способа управления с точки зрения минимизации потерь мощности в силовых ключах инвертора и в элементах снабберных цепей.

Процесс передачи электрической энергии на автономный подводный аппарат (АНПА) сопровождается определенными преобразованиями, характер которых зависит от принятого способа электроснабжения.

В [1] приводится анализ трех основных способов передачи электрической энергии под водой: контактный – с помощью проводных электрических линий с электросоединителями, бесконтактный (индукционный) и генераторный. Сопоставление перечисленных способов по таким основным критериям, как влияние окружающей среды, необслуживаемость, эффективность передачи энергии, размеры и масса системы передачи, изоляция от морской воды, влияние на движение АНПА и др. показывает предпочтительность бесконтактного способа передачи энергии на аппарат, при котором структуру системы энергообеспечения АНПА можно представить, как показано на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема системы энергообеспечения АНПА: 1 – источник электроэнергии, 2 - автономный инвертор, 3, 4 –первичная и вторичная части высокочастотного трансформатора ВчТ, 5 – выпрямитель, 6 - автоматическое зарядное устройство, С1, С2 – конденсаторы, АБ – аккумуляторная батарея

В общем случае в состав системы энергообеспечения входят источник электроэнергии 1, автономный инвертор 2, высокочастотный трансформатор ВчТ с выполненными раздельно первичной 3 и вторичной 4 частями, выпрямитель 5, зарядное устройство 6, сглаживающие фильтры C1, C2 и аккумуляторная батарея АБ. Источник электроэнергии входит в состав корабельного обеспечения и состоит из силового согласующего трансформатора и выпрямителя. Автономный инвертор из входного напряжения постоянного тока создает выходное напряжение переменного тока, которое имеет прямоугольную форму и является первичным напряжением высокочастотного трансформатора ВчТ. Частота преобразования обычно принимается равной десяткам килогерц. Выпрямитель на вторичной стороне ВчТ также должен быть высокочастотным, т. к. применение обычных силовых выпрямительных диодов на указанных частотах приведет к недопустимому возрастанию потерь. Структура зарядного устройства, которое целесообразно выполнять на основе импульсных преобразователей, определяется требованиями к процессу заряда аккумуляторной батареи конкретного типа.

Надежность функционирования системы зависит от корректности проектирования, а также от соблюдения определенных правил конструктивного исполнения силовых импульсных преобразователей, входящих в состав системы энергообеспечения АНПА.

Особые проблемы сопровождают разработку автономного инвертора. Это связано с высокими скоростями изменения тока современных электронных ключей и наличием паразитных индуктивностей в цепях коммутации. Существуют достаточно простые решения [3, 4], следование которым позволяет свести к минимуму коммутационные перенапряжения. Вместе с тем, определенные ограничения на конструкцию инвертора не позволяют в полной мере применить на практике рекомендации по выбору, например, типа и значений номиналов элементов снабберных цепей или выполнить требования к топологии DC-шины устройства. Эти ограничения объясняются необходимостью размещения инвертора в герметичном контейнере весьма ограниченного объема. При этом, помимо решения задачи уменьшения коммутационных перенапряжений до допустимого уровня, необходимо обеспечить отвод и рассеивание тепла как от силовых элементов инвертора, так и от элементов снабберных цепей, однако при компоновке инвертора в указанном конструктиве не всегда удается разместить тепловыделяющие элементы в оптимальных для охлаждения условиях.

Номинальной передаваемой на АНПА электрической мощности можно поставить в соответствие некоторый номинальный режим работы системы. Будем считать, что в этом режиме выполнено точное совмещение стыковочных поверхностей первичной и вторичной частей высокочастотного трансформатора, коэффициент заполнения управляющих импульсов D = 1 и, кроме этого, температура окружающей среды в месте расположения контейнера с автономным инвертором также равна некоторой номинальной.

При отклонении от номинального режима, например, при увеличении расстояния между стыковочными поверхностями частей ВчТ или появлении осевого смещения в ВчТ уменьшается магнитная связь между его катушками, что приведет к увеличению потребляемого тока первичной обмоткой ВчТ и, соответственно, к увеличению перегрева как силовых ключей инвертора, так и провода ВчТ. К такому же результату приведет повышение температуры окружающей среды как причины ухудшения условий охлаждения контейнера с инвертором и создания предпосылок для отказа функционирования системы. Очевидно, что для сохранения работоспособности необходимо определенным образом изменять управление чтобы ток слелствие. ключами инвертора так. ограничивать И. как перегрев тепловыделяющих элементов на допустимом уровне.

При анализе сигналов управления инвертора, а также его выходного напряжения используем схему, изображенную на рис. 2.



Рис. 2 Схема силовой части автономного инвертора системы энергообеспечения подводного объекта

На этом рисунке показана силовая часть автономного инвертора, используемого в системе энергообеспечения. Силовые ключи на IGBT- транзисторах соединены по мостовой схеме, имеющей лучшие энергетические показатели по отношению к другим схемам однофазных инверторов. Паразитная индуктивность шины питания (шины DC) показана как L_m. Нагрузка инвертора Z_{HAFP} представляет собой первичную обмотку высокочастотного трансформатора ВчT, подключенную к выходной диагонали мостовой схемы, к другой диагонали подсоединен источник постоянного напряжения. Снабберы – элементы R1, C1 ...R4, C4.

Для мостовой схемы инвертора импульсы управления u1 ... u4 должны обеспечивать поочередное попарное открывание ключей, при этом одну половину периода коммутации будут открыты транзисторы VT1, VT4, а вторую половину периода – транзисторы VT2, VT3. Коэффициент заполнения D импульсов управления для номинального режима равен максимальному и отличается от единицы на малое значение, определяемое необходимой задержкой при переключении транзисторов. Эта задержка, называемая «мертвое время» (dead time), исключает одновременное открытие транзисторов одной стойки (VT1, VT2 или VT3, VT4), которое обычно приводит к разрушающему сквозному току и выходу транзисторов из строя. Однако чтобы не загромождать рисунки дополнительными деталями, на диаграммах напряжений эту задержку показывать не будем.

Диаграммы управляющих импульсов $u1(\omega t) \dots u4(\omega t)$ для коэффициента заполнения D=1 приведены на рис. 3, а. Там же показан соответствующий график выходного сигнала $u_{\text{вых}}(\omega t)$ инвертора для этого случая. Схема имеет два состояния и действующее значение напряжения на нагрузке и, соответственно, выходной ток инвертора можно изменять только одним способом – варьируя уровень постоянного напряжения $U_{\Pi UT}$. Это предполагает выполнение источника электроэнергии 1 на рис. 1 в виде управляемого источника.

Изменение напряжения на нагрузке инвертора Z_{НАГР} можно обеспечить иначе: регулируя коэффициент заполнения D управляющих импульсов. При этом возможны несколько вариантов формирования управления u1 ... u4.

Для <u>первого</u> варианта вид управляющих импульсов показан на рис. 3, б. Изменение коэффициента D производится симметрично для сигналов u1, u4 и u2, u3. Выходное напряжение инвертора $u_{BbIX}(\omega t)$ будет повторять форму сигналов управления только в случае активной нагрузки инвертора. При наличии индуктивности в цепи нагрузки, что имеет место при подключении трансформатора ВчТ, $u_{BbIX}(\omega t)$ примет вид, как изображено на рис. 3, б. Показанный на рисунке интервал времени τ соответствует проводимости ключей VT2, VT3 под действием управления u2, u3, а интервал времени γ определяется временем разряда ЭДС самоиндукции нагрузки через оппозитные диоды VD1, VD4 и конденсатор С.

Для <u>второго</u> варианта управления инвертором сигналы $u1(\omega t)$... $u4(\omega t)$ и соответствующее выходное напряжение $u_{\text{вых}}(\omega t)$ показаны на рис. 3, в. В этом варианте изменение коэффициента заполнения D выполняется только для одного из транзисторов каждой стойки, например, для нижних транзисторов VT2 и VT4, тогда как каждый из верхних транзисторов VT1, VT3 остается открытым в течение всего полупериода коммутации.

Форма выходного напряжения $u_{\text{вых}}(\omega t)$ для данного случая повторяет сигналы управления, т.к. по истечении интервала τ нижний транзистор стойки закрывается и образуется цепь короткого замыкания нагрузки и, соответственно, напряжение на нагрузке практически равно нулю. Например, для интервала работы ключа VT3 напряжение на нагрузку передается только на интервале τ открытого состояния парного ключа VT2. После закрывания VT2 ЭДС самоиндукции нагрузки будет замыкаться через оставшийся открытым ключ VT3 и оппозитный диод VD1, т.е. напряжение на нагрузке будет равно сумме падений напряжений на этих открытых элементах.

Как следует из диаграмм напряжений на рис. 3, в, фронты изменяемых по длительности импульсов управления u2 или u4 совпадают с фронтами соответствующих парных импульсов u3 или u1. Возможен также **третий** вариант формирования импульсов u2

и u4, при котором совпадать будут их спады со спадами соответствующих парных импульсов u3 и u1. И, наконец, <u>четвертый</u> вариант: изменяемые по длительности импульсы управления u2, u4 формируются посередине полупериода коммутации, т.е. симметрично относительно фронта и спада соответствующего парного импульса u3 и u1.

Следует заметить, что реализация второго варианта формирования управляющих импульсов возможна другим способом – phase shift [2], при котором коэффициент заполнения остается неизменным и равным максимальному, а переключение каждой стойки транзисторов происходит со смещением по отношению к другой. Результаты такого управления полностью совпадают с управлением по второму способу (рис. 3, б).



Рис. 3. Формирование импульсов управления автономным инвертором: а – с постоянным коэффициентом заполнения D = 1; б – симметричное управление; в – несимметричное управление с формированием интервала проводимости в начале полупериода коммутации

Для выбора предпочтительного способа управления необходимо, очевидно, выполнить сравнительную оценку каждого из них по критичным характеристикам: эффективности передачи энергии, потерям мощности в силовых ключах, а также потерям в снабберных цепях.

Исключим из анализа первый способ управления, требующий применения регулируемого источника питающего напряжения. Этот способ требует дополнительного исследования, которое не входит в задачу настоящей работы.

Рассмотрим подробнее перечисленные четыре варианта регулирования действующего значения выходного напряжения инвертора путем изменения коэффициента заполнения D управляющих импульсов.

Сравнительная оценка этих вариантов была выполнена на основе подробного исследования математической модели системы энергообеспечения АНПА, созданной в комплексе MatLab. Математическая модель соответствует структурной схеме системы, приведенной на рис. 1 и основана на использовании прикладной программы Simulink и элементов библиотек Simulink и Sim Power Sistem. Источник электроэнергии 1 на рис. 1

представлен в модели сочетанием трехфазного источника напряжения частотой 50 Гц и трехфазного мостового неуправляемого выпрямителя с настройками, соответствующими реальному устройству. Автономный инвертор 2 на рис. 1 реализован в модели в виде мостовой схемы на IGBT-транзисторах с оппозитными диодами. Каждый транзистор зашунтирован снабберной RC-цепью. Параметры элементов модели инвертора также единичными соответствуют реальной схеме с масштабными коэффициентами. Высокочастотный трансформатор ВчТ в модели представлен в виде магнитосвязанных катушек индуктивности. Вторичная обмотка ВчТ в модели через выпрямитель и нагрузочный сглаживаюший конденсатор подключена на резистор. Созданная энергообеспечения позволяет регистрировать математическая модель системы ДЛЯ различных режимов работы сигналы управления инвертором, выходное напряжение инвертора, токи первичной и вторичной обмоток ВчТ, а также напряжение на вторичной обмотке ВчТ и ток нагрузки. Регистрация может осуществляться как в виде мгновенных значений указанных сигналов, так и вычисленных среднеквадратичных значений.

Важный вопрос, который требует ответа при создании математической модели, это оценка ее адекватности оригиналу, т.е. реальному объекту. В нашем случае эта оценка можем быть выполнена путем сопоставления мгновенных значений основных характерных сигналов в модели и в макете, а также некоторых интегральных зависимостей. В качестве одного примера на рис. 4 приведены такие диаграммы для коэффициента D = 0,34. Переменные модели имеют верхний индекс (*).



Рис. 4. Диаграммы сигналов в системе энергообеспечения АНПА при импульсах управления инвертором с коэффициентом заполнения D = 0.34: а – в лабораторном макете, б – в математической модели; u1,u4 - импульсы управления на входах ключей VT1, VT4, U₁, I₁ – напряжение и ток первичной обмотки ВчТ, U₂, I₂ – напряжение и ток вторичной обмотки ВчТ

Зависимость полной выходной мощности инвертора от коэффициента заполнения D для первой гармоники выходного напряжения в точках **a** и **б** (рис. 2) можно определить выражением [2]



Рис. 5. Зависимость полной выходной мощности инвертора S от коэффициента заполнения D: 1 – рассчитанная по формуле (1), 2 – вычисленные в модели, 3 - снятые на лабораторном макете

$$S = \frac{8U_{\Pi HT}^2 \sin^2 \frac{\pi D}{2}}{\pi^2 Z_{HATP}}$$
(1)

т.е. выходная мощность инвертора пропорциональна квадрату синуса от значения коэффициента заполнения D. На рис. 5 приведены зависимости полной выходной мощности S инвертора ОТ коэффициента заполнения D, рассчитанные по формуле (1), вычисленные в модели энергообеспечения системы И снятые экспериментально на лабораторном макете.

Практически полное совпадение графиков 3 2 И лополнительно свидетельствует об адекватности математической модели, различие между 2. 3 графиками И объясняется 1 приближенным характером выражения (1), где не учитывалось «мертвое время» в управляющих сигналах, а также высшие гармоники выходном напряжении в инвертора.

Таким образом, разработанная модель системы энергообеспечения позволяет получить достоверные результаты при исследовании автономного инвертора в различных режимах и выбрать наилучший в определенном смысле способ формирования сигналов управления инвертором. Очевидно, что решение этой задачи на реальном макете было бы сопряжено со значительными метрологическими проблемами.

Основные результаты исследования следующие. Если принять потери мощности на ключах инвертора в относительных единицах $P_{II, OE}$ для номинального режима работы за единицу и, аналогично, для суммарных потерь мощности $P_{C, OE} = 1$ на элементах R1 ...R4 снабберных цепей (рис. 2), то при уменьшении коэффициента D с целью снижения выходного тока инвертора в два раза по отношению к номинальному режиму, соответствующие потери мощности в инверторе и на снабберах для различных вариантов формирования управления будут иметь значения, показанные в таблице 1.

Варианты управления	Коэффициент заполнения D	Ри, ое	P _{C, OE}
первый	0,291	0,324	1,51
второй	0,244	0,399	0,961
третий	0,226	0,361	1,50
четвертый	0,280	0,328	1,62

Таблица 1. Потери мощности на ключах инвертора и на снабберах для различных вариантов формирования импульсов управления инвертором

Если развести обмотки ВчТ на достаточно большое расстояние, что в модели будет соответствовать отсутствию магнитной связи между обмотками, то для коэффициента D = 1 потери мощности примут следующие значения: $P_{U, OE} = 1,22$, $P_{C, OE} = 0,997$. При уменьшении

коэффициента заполнения D с сохранением обозначенного условия, соотношения между номером варианта и потерями остаются примерно такими же, как в таблице 1.

На основании изложенного можно сделать убедительный вывод о предпочтительности второго способа формирования сигналов управления инвертором.

Литература

1. Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Структура системы электроснабжения автономного необитаемого подводного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2013. № 3/140. С. 47-55.

2. В.И. Мелешин. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2006. - 632 с.

3. Колпаков А.И. Проблемы проектирования IGBT- инверторов: перенапряжения и снабберы // Компоненты и технологии. 2008. №5.

4. Колпаков А.И. Топология частотных преобразователей средней и большой мощности // Компоненты и технологии. 2002. №2.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА С БЕСКОНТАКТНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ЭНЕРГИИ

В.А. Герасимов, В.В. Копылов, А.Ю. Филоженко, П.И. Чепурин

Институт проблем морских технологий ДВО РАН 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел (423) 2432416 e-mail: gerasimov@marine.febras.ru

В докладе рассматриваются вопросы создания математической модели системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата, обосновывается адекватность модели на основании сопоставления основных количественных и качественных взаимосвязей в модели и в лабораторном макете.

Основными функциями системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) являются передача электрической энергии с обеспечивающего корабля на АНПА и необходимое преобразование этой энергии с целью заряда аккумуляторных батарей аппарата по заданному алгоритму.

В [1] приводится анализ основных способов передачи электрической энергии под водой, и отмечаются определенные преимущества бесконтактного (индукционного) способа. Структура системы энергообеспечения для этого случая может быть представлена, как показано на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема системы энергообеспечения АНПА при бесконтактной передаче электроэнергии: В₁, В₂ – выпрямители, И – инвертор, ВчТ – высокочастотный трансформатор, С₁, С₂ – сглаживающие фильтры, Н - нагрузка

Судовая сеть как источник переменного тока и выпрямитель B_1 относятся к корабельному обеспечению и размещаются на борту корабля. Инвертор, который преобразует входное постоянное напряжение в переменное высокочастотное напряжение прямоугольной формы, фильтр C_1 , а также первичная обмотка 1 высокочастотного трансформатора (BчT), подключенная на выход инвертора, размещаются в герметичном контейнере с возможностью погружения под воду на глубину нахождения АНПА. Вторичная обмотка 2 трансформатора ВчT, выпрямитель B_2 , фильтр C_2 и нагрузка H размещаются в герметичных контейнерах на АНПА. Трансформатор ВчT выполнен с разделяющимися первичной и вторичной обмотками. При совмещении стыковочных поверхностей этих обмоток и происходит процесс бесконтактной передачи электроэнергии. Блок H на рис. 1 представляет собой нагрузку системы энергообеспечения. В случае более полной детализации системы под блоком H следует понимать автоматическое зарядное устройство и аккумуляторную батарею. При решении задач, поставленных в настоящей работе, а именно – моделирование системы энергообеспечения с целью определения характеристик процесса передачи энергии, - блок H целесообразно представлять как нагрузочный резистор R.

Эффективность передачи энергии в системе, показанной на рис. 1, определяется большим числом взаимосвязанных факторов. К ним можно отнести значение частоты преобразования инвертора, геометрические и электрические характеристики обмоток трансформатора ВчТ, точность совмещения стыковочных поверхностей этих обмоток при передаче электроэнергии и т. п.

Учитывая сложность аналитического описания всего процесса передачи, рациональным подходом следует признать использование математического моделирования системы. Аналитические зависимости в этом случае определяются для отдельных фрагментов системы и используются для частной оценки адекватности математической модели [2]. Значительное упрощение этой задачи обеспечивает также наличие разработанного и изготовленного лабораторного макета системы энергообеспечения, который по своей структуре полностью соответствует схеме рис. 1.

Можно считать, что совместное рациональное использование математической модели системы энергообеспечения, реального макета системы, а также некоторых аналитических зависимостей позволит получить достоверные характеристики процесса передачи энергии в полном диапазоне изменения входного напряжения системы, вариациях значений тока нагрузки, а также изменений коэффициента магнитной связи между обмотками ВчТ, равносильного введению ошибки в совмещении стыковочных поверхностей этих обмоток. Очевидно, что такой подход оптимизирует материальные затраты, исключает физические последствия возможных аварийных режимов при экспериментах и минимизирует общее время разработки.

Выбор программы для выполнения математического моделирования связан с поставленными задачами. Из современного множества прикладных пакетов математического моделирования условно можно выделить программы для схемотехнического моделирования (Micro Cap, Electronics Workbench, Multisim) и программную среду MATLAB-Simulink.

Первая группа программ характерна достаточно точным математическим описанием статических и динамических характеристик обширного перечня различных дискретных электронных и электротехнических устройств, а также интегральных аналоговых и цифровых микросхем. Это позволяет создавать модели, являющиеся практически полным отражением соответствующей реальной схемы.

Однако попытка использовать подобные программы для построения математической модели системы, схема которой приведена на рис. 1, сопряжена с определенными проблемами. Указанное выше достоинство точного описания элементов приводит к тому, что модели отдельных устройств, входящих в состав системы, приходится собирать из моделей отдельных дискретных элементов. Для достаточно большой схемы это увеличивает время решения, в ряде случаев нарушаются условия сходимости и решение становится невозможным.

Пакет MATLAB с расширением Simulink, напротив, ориентирован в первую очередь, на обработку массивов данных (матриц и векторов). Однако, используя элементы дополнительной библиотеки расширения Sim Power Sistem (SPS), в среде Simulink можно создавать математические модели сложных электротехнических систем с достаточной степенью детализации и совпадающие по схемотехнике с исходным оригиналом. Эти условия определяют предпочтительность использования MATLAB для моделирования системы энергообеспечения АНПА. Вместе с тем, для решения вопросов проектирования отдельных фрагментов системы целесообразно использовать, например, программу имитационного схемотехнического моделирования Multisim.

Схема математической модели системы энергообеспечения подводного аппарата, реализованная в MATLAB, показана на рис. 2, а. По набору функциональных блоков модель системы полностью совпадает с исходной структурной схемой (рис. 1). Модель автономного инвертора (рис. 2, б) состоит из дискретных элементов библиотеки SPS, объединенных в один модуль функцией «subcircuit», и также соответствует реальной структуре (приведена в докладе «Управление автономным инвертором в системе энергообеспечения АНПА»

авторов В.А. Герасимова и др.). Узел формирования сигналов управления инвертором (рис. 2,г), обеспечивает генерацию различных видов управлений: симметричного, несимметричного трех видов, фазового управления, что позволяет выполнять всестороннее исследование характеристик процесса передачи электроэнергии на подводный аппарат. Оценку параметров передачи при имитации разведения обмоток ВчТ на большое расстояние можно выполнить, например, при модификации полной схемы модели к виду рис. 2, в.



Рис. 2. Моделирование системы энергообеспечения подводного аппарата в MATLAB: а – схема модели системы, б – модель автономного инвертора, в – схема модели системы при исключении вторичной обмотки ВчТ, г – модель узла формирования сигналов управления инвертором

Для оценки адекватности модели использовалось сопоставление основных характеристик процесса передачи энергии, полученных в лабораторном макете системы и в предложенной математической модели с единичными масштабными коэффициентами.

К таким характеристикам можно отнести связь между напряжением и током нагрузки $U_2 = f(I_2)$ для различных значений коэффициента заполнения D импульсов управления инвертором, эти зависимости определяют условия осуществления заряда аккумуляторной батареи. Безусловно, важной характеристикой процесса передачи энергии на аппарат является зависимость КПД **η**, % системы от тока нагрузки I₂. Эти характеристики, снятые в макете и в модели и изображенные в общих координатах, приведены на рис. 3, 4.



Рис. 3. Зависимости напряжения на нагрузке от тока нагрузки для различных значений коэффициента D: 1 – D = 0,915, 2 – D = 0,553, 3 = D = 0,34; непрерывные линии – макет, штриховые - модель



Рис. 4. Зависимости КПД системы от тока нагрузки: 1, 2 – в модели, 3 – в макете; для графика 1 – шаг решения в модели равен 1 мкс, для графика 2 – шаг равен 0,01 мкс

Рис. 3 свидетельствует о хорошем качественном совпадении макетных и модельных характеристик. Относительно количественных отличий можно сделать заключение о некотором расхождении в точках холостого хода и короткого замыкания, тогда как в рабочем диапазоне изменений выходных напряжений и токов, обеспечивающих заряд аккумуляторной батареи подводного аппарата, совпадение является хорошим. Отметим, что в макете испытания системы проводились при входном напряжении инвертора $U_1 = 50$ В, что было связано с ограничениями по мощности лабораторного нагрузочного оборудования. Для удобства сопоставления макета и модели исследования в модели также проводились при входном напряжении инвертора, равном 50 В. К рабочим параметрам характеристики системы приводятся простым масштабным преобразованием координат. Это положение было проверено и подтверждено экспериментально. Отмеченный выше рабочий диапазон на рис. 3 соответствует напряжению на нагрузке $U_2 = 20$ В.

На рис. 4 наглядно видно влияние шага решения в математической модели на точность воспроизведения графика зависимости $\eta = (I_2)$. Расхождение между результатами исследования системы в модели (график 1) и в макете (график 3) сводится до приемлемого минимума при уменьшении шага с 1 мкс до 0,01 мкс (график 2), при этом, естественно, возрастает время решения.

Для решения вопросов реализации защитных функций системы при выходе эксплуатационных условий за номинальные пределы (увеличение выходного тока инвертора при разобщении первичной и вторичной обмоток ВчТ или ухудшении условий охлаждения контейнера с инвертором) представляет интерес регулировочные характеристики – зависимость напряжения U₁ на первичной обмотке ВчТ от коэффициента заполнения D, а также зависимость действующего значения тока I₁ первичной обмотки ВчТ от коэффициента заполнения D для различных видов управляющих сигналов.

Эти графики приведены на рис 5, 6. Широтно-импульсное регулирование, выполняемое изменением коэффициента заполнения D импульсов управления инвертором, рассмотрено двух видов: симметричное и несимметричное с формированием управляющего импульса в начале интервала проводимости ключей инвертора. В докладе «Управление автономным инвертором в системе энергообеспечения АНПА» авторов В.А. Герасимова и др.) отмечено преимущества такого несимметричного управления с точки зрения потерь в элементах снабберных цепей инвертора. Графики на рис. 5, 6 дополнительно свидетельствуют в пользу этого выбора: регулирование тока и напряжения на выходе инвертора выполняется в полном диапазоне изменения коэффициента D, тогда как при симметричном управлении этот диапазон сужается почти в два раза.



Рис. 5. Зависимость действующего значения напряжения U₁ на выходе инвертора от коэффициента заполнения D при разобщении обмоток ВчТ: 1 - симметричное управление, 2 – несимметричное управление; непрерывные линии – макет, штриховые - модель



Рис. 6. Зависимость действующего значения тока I₁ на выходе инвертора от коэффициента заполнения D при разобщении обмоток ВчТ: 1 симметричное управление, 2 – несимметричное управление; непрерывные линии – макет, штриховые - модель

Достаточно хорошее совпадение между результатами исследований макета системы и ее математической модели, следующее из графиков на рис. 5, 6, позволяет сделать дополнительное заключение о достоверности модели, т.е. о полном качественном и количественном отражении характерных свойств реального объекта. Это позволит получить новые результаты для последующего проведения структурной и параметрической оптимизации системы энергообеспечения АНПА.

Литература

1. Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Структура системы электроснабжения автономного необитаемого подводного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2013. № 3/140. С. 47-55.

2. Герасимов В.А., Копылов В.В., Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Себто Ю.Г., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Математическая модель устройства для бесконтактной передачи электроэнергии на подводный объект // Подводные исследования и робототехника. 2012. № 2. С. 28 – 33.
УЛУЧШЕННАЯ АППРОКСИМАЦИЯ РАСЧЕТНОГО СПЕКТРА НЕРЕГУЛЯРНОГО МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ

Г.Е. Кувшинов^{*}, Л.А. Наумов^{**}, П.И. Чепурин^{**}, К.В. Чупина^{*}, Н.Л. Ющенко^{****}

Дальневосточный федеральный университет, 690600, Владивосток, ул. Пушкинская, 10, тел /факс: (423) 2266988, e-mail: kuvsh @marine.febras.ru

^{**} Институт проблем морских технологий ДВО РАН. 690950, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел /факс: (423) 2432416, e-mail: impt @marine.febras.ru

*** Дальневосточный государственный университет путей сообщения 680021, Хабаровск, ул. Серышева, 47, тел /факс: (4212) 647124 e-mail: zameni @festu.khv.ru

В докладе рассматриваются особенности известного расчётного спектра морского волнения. Показаны недостатки известных аппроксимаций этого спектра, которые позволяют моделировать нерегулярное морское волнение во временной области. Предложена аппроксимация, лишённая этих недостатков.

Расчётный спектр морского волнения 12-ой МКОБ, имеющий в настоящее время наибольшее применение, в нормированном, безразмерном, виде выражается формулой [1, 2]:

$$s_{\zeta_{\Pi TC}}(\omega) = \frac{S_{\zeta_{\Pi TC}}(\omega)\omega_m}{D_{\varsigma}} = 5 \pi x^{-5} \exp\left(-1, 25 x^{-4}\right), x = \frac{\omega}{\omega_m},$$

где $S_{\zeta_{nTC}}$ – спектральная плотность в исходном, ненормированном виде, $D_{\zeta} = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\infty} S_{\zeta}(\omega) d\omega$ – дисперсия волновых ординат ζ , м²; ω – угловая частота, ω_m – угловая частота максимума спектра. Для нормированного спектра справедливо равенство $\underline{D}_{\zeta_{nTC}} = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\infty} s_{\zeta}(x) dx = 1$, а нормированное значение частоты максимума спектра $x_m = 1$.

Соответствующие ненормированному спектру $S_{\zeta_{nnc}}$ значения дисперсии волновых ординат и угловой частоты максимума спектра для некоторых значений степени волнения приведены в табл. 1.

Парамотр	Степень волнения, баллы							
параметр	3	4	5	6				
Дисперсия волновых ординат D_{ζ} , м ²	0,0	0,1	0,4	1,2				
	56	43	38	9				
Угловая частота максимума спектра ω_m , с ⁻¹	1,2	0,9	0,7	0,5				
	1	91	46	72				

Таблица 1. Основные параметры расчётного спектра 12-
--

Нормированные выражения спектральных плотностей скоростей, ускорений и рывков волновых ординат для расчётного спектра 12-ой МКОБ, а также соответствующие им дисперсии определяются выражениями:

$$s_{\zeta_{\Pi TC}} = s_{\zeta_{\Pi TC}} x^2, s_{\zeta_{\Pi TC}} = s_{\zeta_{\Pi TC}} x^4, s_{\zeta_{\Pi TC}} = s_{\zeta_{\Pi TC}} x^6,$$
(2)

$$\underline{D}_{\zeta_{\Pi T C}} = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\infty} s_{\zeta}(x) x^{2} dx, \\ \underline{D}_{\zeta_{\Pi T C}} = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\infty} s_{\zeta}(x) x^{4} dx, \\ \underline{D}_{\zeta_{\Pi T C}} = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\infty} s_{\zeta}(x) x^{6} dx,$$
(3)

Расчёты по формулам (3) показывают, что у расчётного спектра 12-ой МКОБ дисперсии ускорений и рывков волновых ординат бесконечно велики.

Важной характеристикой спектра волнения является его ширина:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{D_{\zeta}^2}{D_{\zeta} D_{\zeta}}} = \sqrt{1 - \frac{\underline{D}_{\zeta}^2}{\underline{D}_{\zeta} \underline{D}_{\zeta}}}.$$
(5)

Узким считается спектр, у которого $\varepsilon < 0,4$, при этом распределение амплитуд и высот волн точнее следует закону Рэлея. В противном случае спектр называется широким. С приближением ε к единице распределение экстремумов лучше определяется сначала законом Райса, а затем нормальным законом [3]. Расчётный спектр 12-ой МКОБ является широким.

Для формирования какого-либо случайного процесса с заданной спектральной плотностью берут отсчёты белого шума и пропускают их через соответствующий фильтр. У этого фильтра при любом значении угловой частоты квадрат ординаты амплитудной частотной характеристики должен быть равен значению указанной спектральной плотности при этой частоте. Обычно используют рекурсивные фильтры, передаточные функции которых соответствуют системе обыкновенных дифференциальных уравнений. При этом квадрат модуля частотной передаточной функции (модульная функция) является дробнорациональной функцией от квадрата угловой частоты.

Спектр (1) не обладают этим свойством. Поэтому для имитации морского волнения его необходимо аппроксимировать дробно-рациональными функциями от аргумента x^2 . Этому спектру, как и большинству других, присущ и второй недостаток: дисперсия ускорения волновых ординат бесконечно велика, что не соответствует реальности. При аппроксимации спектра (1) необходимо избавиться и от этого недостатка.

В [1] приведена методика аппроксимации спектра 12-ой МКОБ:

- 1. В функции $s_{\zeta_{nTC}}(x) = 5 \pi x^{-5} \exp(-1, 25 x^{-4})$ выполняется замена $x = y^{\frac{1}{2}}$.
- 2. Полученный результат делится на πy^n , где n целое число, при этом получается:

$$s_n(y) = 5 \pi y^{-(2,5+n)} \exp(-1,25 y^{-2}).$$
(6)

3. Производится Паде-аппроксимация $s_n(y)$ рациональной функцией y_{na} , у которой порядок числителя равен нулю, а порядок знаменателя равен (n+m) [4]. Целое число (n+m) должно быть чётным. При этом целое число m должно быть не меньше 3, тогда дисперсия ускорения волновых ординат станет иметь конечное значение.

4. Если y_{na} удовлетворяет требованиям, предъявляемым к модульным функциям, то в ней производится подстановка $y = x^2$, и полученный результат умножается на πx^{2n} .

У найденной таким образом функции $s_{n,(n+m)}(x)$, аппроксимирующей $s_{\zeta_{nTC}}(x)$, порядок числителя равен 2n, а знаменателя – 2(n+m).

График этой функции сравнивается с графиком $s_{\zeta_{nrc}}(x)$. Если отличия в графиках невелики, то на этом операция получения аппроксимирующей нормированной функции может считаться законченной.

Для перехода к спектру, аппроксимирующему ненормированный спектр для конкретной степени волнения, функцию $s_{n,(n+m)}(x)$ умножают на отношение D_{ζ}/ω_m , у которого дисперсия D_{ζ} волновых ординат и угловая частота максимума спектра ω_m соответствуют этой степени волнения. В полученное выражение делается подстановка $x = \omega/\omega_m$.

В [1, 2] приведена аппроксимирующая функция $s_{36}(x)$, у которой n = m = 3:

$$s_{36}(x) = \frac{4,34\pi x^6}{(x^4 - 1,18x^2 + 0,52)(x^4 - 1,38x^2 + 1,29)(x^4 - 2,95x^2 + 11,73)}.$$
(7)

Параметры аппроксимирующей функции y_{na} были найдены с помощью Падеаппроксимации без полиномов Чебышева [4]. При этом используется только одна, расположенная в области максимума $s_n(y)$, точка. Выбор указанной точки производится на основании анализа графиков погрешности аппроксимации, полученных для ряда расчётных точек.

В табл. 2 даны основные параметры нормированного спектра 12-ой МКОБ $s_{\zeta_{nTC}}(x)$ и аппроксимирующих дробно-рациональных спектров $s_{36}(x)$, $s_{48}(x)$ морского волнения.

Таблица 2. Сравнительная характеристика параметров нормированного спектра 12-ой МКОБ и спектров, его аппроксимирующих

Параметр	$s_{\zeta_{ITTC}}(x)$	$s_{36}(x)$	$s_{48}(x)$
Дисперсия волновых ординат \underline{D}_{ζ}	0,999	1,0005	1,002
Дисперсия скоростей волновых ординат $\underline{D}_{\dot{\zeta}}$	1,981	1,6748	1,718
Дисперсия ускорений волновых ординат \underline{D}_{ζ}	x	5,5613	4,941
Дисперсия рывков волновых ординат \underline{D}_{ζ}	x	∞	33,108
Ширина спектра ε	1	0,7041	0,636

Из табл. З видно, что дисперсия ускорений для $s_{36}(x)$ не равна бесконечности, поэтому его ширина меньше единицы. Этот факт обеспечивает меньшую хаотичность изменения ординат морского волнения, по сравнению с известными аппроксимирующими спектрами более низкого порядка: $s_{12}(x)$ и $s_{24}(x)$ [5]. Но у $s_{36}(x)$ бесконечно велика дисперсия рывков волновых ординат, что проявляется в том, что ширина спектра ускорения волновых ординат равна 1, и является недостатком этого спектра.

Методика определения передаточной функции фильтра, формирующего реализацию случайного процесса морского волнения из сигнала «белый шум» [6, 7], приведена в [2] и здесь не показывается. Нормированная передаточная функция фильтра, моделирующего морское волнение в соответствии с нормированным спектром $s_{36}(x)$, имеет вид [2, 5]:

$$W_{36}(\overline{s}) = \frac{3,694\,\overline{s}^3}{(\overline{s}^2 + 0,5111\,\overline{s} + 0,7208)(\overline{s}^2 + 0,9465\,\overline{s} + 1,136)(\overline{s}^2 + 1,974\,\overline{s} + 3,425)},\tag{8}$$

где нормированная переменная \overline{s} связана с ненормированной переменной *s* (аргументом изображения функций времени с помощью преобразования Лапласа [8]) так же, как относительная частота *x* с угловой частотой ω , то есть $\overline{s} = s/\omega_m$.

На осциллограмме моделирования скорости ординат волнения, соответствующей передаточной функции $\overline{s}W_{36}(\overline{s})$, видны характерные вторичные экстремумы (отрицательные максимумы), обращённые выпуклостью к нулевой линии, при этом заметно, что максимумы положительные и отрицательные следуют друг за другом практически без промежутков. График же моделирования случайного процесса ускорения ординат нерегулярного морского волнения, полученный с использованием передаточной функции $\overline{s}^2 W_{36}(\overline{s})$ демонстрируют явно выраженный хаотический характер [5]. Эти осциллограммы будут приведены и в настоящем докладе (рис. 2).

Таким образом, с учётом этих и ранее указанного недостатков спектра $s_{36}(x)$, возникает необходимость синтеза такого аппроксимирующего спектра, который будет свободен от недостатков существующих спектров. Для этого разность степеней $y = x^2$ знаменателя и числителя должна быть не меньше четырёх.

Выражение аппроксимирующей спектральной функции $s_{48}(x)$, в отличие от $s_{36}(x)$, получено при использовании Паде-аппроксимации с полиномами Чебышева [4]. Для этого выбирается не конкретная точка графика функции $s_n(y)$, а диапазон значений у. Для принятого диапазона $0,6 \le y \le 2,7$ найдено выражение (9):

$$s_{48}(x) = \frac{2,58 \pi x^8}{\left(x^4 - 1,104 x^2 + 0.372\right)\left(x^4 - 1,507 x^2 + 0.874\right)\left(x^4 - 2,37 x^2 + 2.98\right)\left(x^4 - 7,31 x^2 + 17.70\right)}.$$

На рис. 1 показаны графики нормированных функций: исходной $s_{\zeta_{nTC}}(x)$ и её аппроксимирующих расчётных нормированных спектров $s_{36}(x)$ и $s_{48}(x)$, а также графики их абсолютных погрешностей.



Рис. 1. Графики исходного спектра 12-ой МКОБ $s_{\zeta_{\Pi TC}}(x)$ и его аппроксимирующие нормированные спектры $s_{36}(x)$ и $s_{48}(x)$, а также относительные погрешности аппроксимаций:

a) сплошная линия – исходный спектр $s_{\zeta_{nTC}}(x)$, штрихпунктирная линия – $s_{36}(x)$, штриховая линия – $s_{48}(x)$; б) штрихпунктирная линия – график разности $s_{36}(x)$ и $s_{\zeta_{nTC}}(x)$, штриховая линия – график разности $s_{48}(x)$ и $s_{\zeta_{nTC}}(x)$

Максимальная относительная погрешность (в долях от амплитудного значения $s_{\zeta_{nTC}}(x)$, которое равно 4,5) аппроксимирующего спектра $s_{36}(x)$ составляет около 11%, а спектра $s_{48}(x)$ – около 2,5%. Следовательно, лучшее приближение имеет спектр $s_{48}(x)$.

Рис. 1, δ показывает, что диапазон аппроксимации для $s_{48}(x)$ выбран верно. Максимальные абсолютные значения положительных и отрицательных погрешностей получились примерно одинаковыми.

Выражению (9) соответствует следующая передаточная функция фильтра, формирующего последовательность ординат морского волнения из сигнала «белого шума» (10):

$$W_{48}(\overline{s}) = \frac{2,85\,\overline{s}^4}{(\overline{s}^2 + 0,3406\,\overline{s} + 0,610)(\overline{s}^2 + 0,6017\,\overline{s} + 0,9347)(\overline{s}^2 + 1,041\,\overline{s} + 1,726)(\overline{s}^2 + 1,052\,\overline{s} + 4,207)}$$

Сравним результаты моделирования нерегулярного морского волнения с использованием передаточных функций аналоговых формирующих фильтров $W_{36}(\bar{s})$ и $W_{48}(\bar{s})$. Для моделирования волнения была выбрана математическая среда MATLAB и её специализированный пакет программных средств Simulink [9].

Здесь необходимо заметить, что для сравнения получаемых при моделировании графиков и обработки их ординат, с целью нахождения дисперсий или гистограмм распределения ординат, следует отбрасывать начальную часть выборки ординат, чтобы исключить влияние переходного процесса в формирующем фильтре. На рис. 2 показаны графики случайного процесса изменения во времени волновых ординат (*a*), скорости (б) и ускорения (в) их изменения. Графики приведены во временной области на интервале от 200 до 300 с после начала моделирования.





Из рис. 2, *а* видно, что ординаты нерегулярного волнения, полученные на выходе передаточной функции $W_{36}(\bar{s})$, имеют более выраженные вторичные максимумы, обращенные к нулевой средней линии процесса. Графики, приведённые на рис. 2, *б*, показывают, что скорости ординат, полученные на выходе передаточной функции $W_{36}(\bar{s})\bar{s}$, имеют более выраженный хаотический характер по сравнению с $W_{48}(\bar{s})\bar{s}$, в них имеется значительное количество вторичных максимумов. На рис. 2, *в* показаны графики случайного процесса изменения во времени ускорений волновых ординат. Из этого рисунка можно заметить, что ускорения ординат на выходе $W_{48}(\bar{s})\bar{s}^2$ носят менее хаотичный характер, а также генерируется меньшее число отрицательных максимумов.

Заключение

Таким образом, синтезированная дробно-рациональная спектральная плотность $S_{48}(x)$, которая аппроксимирует международный спектр 12-ой МКОБ, имеет большую, чем у известных аппроксимаций, разность степеней полиномов знаменателя и числителя. Эта особенность спектра $S_{48}(x)$ позволяет уменьшить отличие дробно-рационального спектра от экспоненциального спектра 12-ой МКОБ и снизить излишнюю хаотичность имитируемого случайного процесса.

Литература

1. Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Чупина К.В. Системы управления глубиной погружения буксируемых объектов: монография. Владивосток: Дальнаука, 2005. – 285 с.

2. Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Чупина К.В. Влияние морского ветрового волнения на глубоководный привязной объект: монография. Владивосток: Дальнаука, 2008. – 223 с.

3. Справочник по теории корабля: В 3-х т. Т. 2. Статика судов. Качка судов. Судовые движители / под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 440 с.

4. Дьяконов В.П. Марle 9,5/10 в математике, физике и образовании. – М.: СОЛОН-Пресс, 2006. – 720 с.

5. Буренин А.А., Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Чупина К.В. Аппроксимация расчётного спектра морского волнения // Подводные исследования и робототехника. 2012. № 2(14). С. 35-42.

6. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2003. 604 с.

7. Голд Б., Рэйдер Ч. Цифровая обработка сигналов. – М.: Советское радио, 1973. – 368 с.

8. Дёч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа. – М.: Наука, 1965. – 288 с.

9. http://www.mathworks.com/

РЕЗУЛЬТАТЫ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗВЕНА МАНИПУЛЯТОРА ПОДВОДНОГО АППАРАТА

А.В. Гетьман

Филиал ВУНЦ ВМФ «Военно - морская академия им. Н.Г. Кузнецова» (ТОВМИ им. С.О. Макарова), г. Владивосток 690062, г. Владивосток, Камский переулок 6, тел./факс 2367-287, (4232), e-mail: Alexander_Get@mail.ru

В работе представлены результаты аэродинамических исследований полного сопротивления одиночного цилиндрического звена манипулятора необитаемого подводного аппарата, для различных углов атаки.

При проведении подводно – технических операций с помощью необитаемых подводных аппаратов (НПА) оснащенных манипуляторами возникает задача автоматической компенсации рабочего положения подводного аппарата и манипулятора в морской среде.

Задача может быть решена аналитически, но для расчета сил и моментов вязкого трения и компенсации вредных силовых и моментных воздействий среды на манипулятор и НПА необходимо знать величину коэффициента C_x манипулятора. Этот коэффициент зависит от гидродинамических особенностей поверхности и положения звена манипулятора и определяется экспериментально, например, в лабораторно – модельном аэродинамическом эксперименте.

Как любое экспериментальное исследование, измерение на аэродинамической трубе AC-1 включает в себя следующие стадии: формулировку цели исследования; составление программы эксперимента, методическую и материальную подготовку эксперимента; проведение эксперимента и обработку первичных данных в реальном масштабе времени; обработку данных и оценку погрешности измерения; анализ полученных данных, формулировку результата исследования и оценку исследования.

В общем случае измерение физических величин представляло собой многоступенчатый процесс, состоящий как из самой процедуры измерений, включающей типовые измерительные операции, так и ряда подготовительных и заключительных процедур, которые выполнялись до и после выполнения самих измерений.

Итак, процесс измерения в настоящих исследованиях делился на три основных этапа: подготовка и планирование измерений, выполнение измерений, обработка и анализ полученных данных измерений.

Каждое аэродинамическое исследование планировалось с применением математической теории планирования эксперимента и по своему содержанию является многофакторным экспериментом. Обработка результатов измерений проводится с учётом случайных и систематических ошибок методами математического анализа и статистики, с широким использованием компьютерных технологий.

Измерение скорости потока или давления в любой его точке является одним из наиболее важных измерений, производимых в экспериментальной аэродинамике. Ни один опыт не может быть проведен без такого рода измерений. Давление и скорость должны измеряться с большой точностью, так как аэродинамическая сила зависит от квадрата скорости, и ошибка в определении скорости будет приводить к еще большей ошибке в величинах аэродинамических сил.

В настоящих экспериментальных исследованиях применялся пневмометрический метод фиксации статического и динамического давления в потоке приемниками этого давления. Измерение величин давления производилось манометрическим способом, лабораторным жидкостным «U» - образным дифференциальным микроманометром.

Конструкция экспериментальной установки разработана, исходя из задач, поставленных настоящим исследованием [3]. Схема экспериментальной установки для определения сопротивления звена манипулятора методом импульсов [4] приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения сопротивления звена манипулятора методом импульсов:

1 – конфузор; 2 – сопло; 3 – рабочая часть; 4 – приемник динамического давления; 5- «U» - образный дифференциальный жидкостный микроманометр приемника динамического давления; 6 – модель одиночного звена манипулятора; 7 – X, Y, Z - координатник; 8 - «U» - образный дифференциальный жидкостный микроманометр приемника динамического и статического давлений; 9 – измеритель, приемник динамического и статического следа модели; 10 – диффузор; 11 - рабочий стол; 12 – подъемник рабочего стола; 13 – подвижная платформа с координатными шкалами; 14 – направляющие платформы; 15 – приборы юстировки рабочего стола; 16 – шкала угловых координат

В рабочей части AC-1 (см. рис. 1), в центре потока, установлена модель одиночного цилиндрического звена манипулятора НПА, с геометрическим подобием модели и натурного звена манипулятора (в масштабе М 1:2). Диаметром 0,05 м; с отношением длины к диаметру l/d = 10.

Модель манипулятора цилиндрической формы выполнена из алюминиемагниевого сплава (с высокой чистотой обработки), может изменять угол атаки $\angle Q^0$ к набегающему потоку, для чего ее разворачивают

вокруг центральной оси O'' в нижней консольной части навстречу потоку, в диапазоне Декартовой системы координат Y; X. При этом она опирается на державку и фиксируется стопорным винтом. Контроль угла поворота модели манипулятора осуществляется при помощи шкалы угловых координат и стрелки, установленной на державке модели. В нижней (консольной) части модель соосно, посредством стопорного винта крепится к подвижному рабочему столу. Стол имеет подъемник и у своего основания силовую винтовую пару, которая жестко закреплена с горизонтальной частью подвижной платформы. Для установки перед опытом модели манипулятора по координатам X'', Y'', Z'', под заданные углы атаки $\angle Q^0$ в центр рабочей части и центр потока AC-1 (в точку O), подвижная платформа и рабочий стол имеют координатные шкалы и приборы юстировки. Причем, для перемещения платформы предусмотрены направляющие платформы с фиксаторами. Таким образом, за счет такой конструкции (см. рис. 1), при плановом варьировании в опыте

параметрами угла атаки $\angle Q_i^o$, рабочий стол и подвижную платформу с моделью манипулятора всегда может установить в заданной точке исследований O перед измерителем давлений, на заданном расстоянии L = 0,65 м (const) от сопла AC-1, что, предусмотрено методикой эксперимента.

Измерение профильного сопротивления методом импульсов (по Джонсу) [4] отличается от других методов, например, динамометрического принципиально более строгого и трудоемкого, большей простотой и удобством в проведении лабораторно - модельных опытов. В тоже время расхождение между другими методами не превышают 2%, что при опытах такого рода следует считать очень небольшой ошибкой.

В многофакторном опыте (рис. 2) все аэродинамические измерения выполнялись «U» - образным дифференциальным жидкостным микроманометром, относящимся к разновидности измерительных показывающих приборов и допускающих только визуальное отсчитывание показаний в мм водяного столба жидкости.



Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки (где модель манипулятора установлена к набегающему потоку под $\angle Q = 45^{\circ}$)

При проведении эксперимента визуальное считывание измерительной информации и компьютерная на ПЭВМ обработка первичных данных всегда осуществлялась в реальном масштабе времени.

Явление формирования коэффициента сопротивления одиночного звена манипулятора изучалось путём проведения многофакторного аэродинамического эксперимента с моделью манипулятора при $\angle Q_i^0 = f(F)$, где F

ПЭВМ с использованием стандартных приложений средств Microsoft Office, программы Excel. площадь эпюры (из опыта) дефекта скорости потока в спутном следе, а $\angle Q_i^0$ – азимутальный угол положения модели манипулятора в потоке по шкале *X*, *Y*, *Z* - координатника.

Результаты всех аэродинамических измерений сопротивления звена манипулятора НПА обрабатывались математическими методами обработки измерений на персональных

В табл. 1, приводится фрагмент электронного журнала с измерениями полного $P_{n.}$ и статического давлений $P_{ct.}$; расчет перепада давлений $\Delta P = P_{n.} + P_{ct.}$ мм в. ст., а также расчет, по формуле (1), скорости потока в следе за манипулятором

$$V = \sqrt{\frac{2g \cdot \xi \cdot \varDelta P}{\rho}} i / \tilde{n}, \qquad (1)$$

	Р _{п.} мм в.	Р _{ст} . ММ В.	ΔР мм в.	<i>V</i> м/с	$ ho$ кг/м 3
C 1VI	CT.	ст.	CT.		
1	2	3	4	5	6
0	159	156	3	-6,97457	1,21
0,5	159	156	3	-6,97457	1,21
1	159	156	3	-6,97457	1,21
1,5	159	156	3	-6,97457	1,21
2	158	157	1	-4,02677	1,21
2,5	158	158	0	0	1,21
3	155	161	6	9,863532	1,21
3,5	144	172	28	21,30766	1,21
4	132	182	50	28,47356	1,21
4,5	130	185	55	29,86333	1,21
5	131	184	53	29,31533	1,21
5,5	132	184	52	29,03745	1,21
6	132	183	51	28,75689	1,21
6,5	132	183	51	28,75689	1,21
7	133	183	50	28,47356	1,21
8	133	182	49	28,18739	1,21
9	134	182	48	27,89828	1,21
10	134	181	47	27,60614	1,21
11	136	180	44	26,71057	1,21
12	137	178	41	25,78391	1,21
13	139	176	37	24,49389	1,21
14	142	172	30	22,05553	1,21
15	145	170	25	20,13385	1,21
16	148	167	19	17,55228	1,21
17	150	163	13	14,51873	1,21

Таблица 1. Фрагмент журнала измерений полного давления и расчета скорости в следе за манипулятором, при X = 0,2 м; $Q = 90^{0}$; $V_0 = 25,81$ м/с

Расчет (см. табл. 1) показан для случая, при расстоянии от сопла X = 0,2 м, пространственном положении манипулятора в потоке $Q = 90^{0}$ и при скорости потока в рабочей части аэродинамической трубы $V_0 = 25,81$ м/с. Все измерения скорости потока V_i в следе манипулятора выполнялись по координате Z – ширине и глубине следа потока X.

Во всех расчетах атмосферная барометрическая плотность среды ρ , определенная перед опытом и оставалась неизменной.

Алгоритм аэродинамических измерений следующий: после установки X, Y, Z-координатником приемника динамического и статического давлений в исследуемую точку O (см. рис. 1) визуальное считывание измерительной информации, 48 экспериментальных точек давления $P_{n.}$ и P_{cr} , выполнялось по координате Z от точки O центра манипулятора, вправо и влево с частотой измерений через 0,5 см до значения 7 см и через 1,0 см до

значения 17 см (по методическим соображениям). Из введенных, вручную на ПЭВМ, посредством клавиатуры (см. табл. 1), экспериментальных значений давления $P_{п.}$ и $P_{cr.}$ с помощью программы Excel рассчитывались как перепады давления ΔP так и скорости потока V_0 в следе за манипулятором (см. табл. 1, графы 2, 3, 4, 5). Причем, на экране монитора ПЭВМ в реальном масштабе времени строился график зависимости $V_i = f(Z_i)$, по потоку (координате X), профиля скорости V_i в спутном следе за цилиндрическим манипулятором НПА. График профиля скоростей спутного турбулентного следа представлен на рис. 3.



Рис. 3. График профиля скорости в турбулентном следе за цилиндрическим манипулятором НПА при $\mathbf{Q}=90^0$

Из графика (см. рис. 3), при положении манипулятора $Q = 90^0$ видно, что боковая граница следа криволинейна, и из - за интенсивного срыва потока с боковой поверхности манипулятора, имеется тенденция к формированию обратного течения. Толщина спутного турбулентного следа с удалением от манипулятора по координате X (изменения скорости потока в следе) увеличивается, а провал, в профиле скорости постепенно выравнивается. Таким образом, полученная экспериментальная кривая убедительно подтверждает общую картину турбулентного следа, основанную на гипотезе турбулентности потока Тейлора [1].

Авторы, используя математические методы обработки измерений на персональных ПЭВМ и стандартные приложения Microsoft Office в программе Excel создали расчетную подпрограмму для процедуры расчета профильного сопротивления C_x и гидродинамического коэффициента сопротивления k^* цилиндрического звена манипулятора НПА.

В процедуре расчета профильного сопротивления C_x , площадь спутного следа (см. рис. 2), ограниченна экспериментальной кривой $\varphi(\delta)$ имеет оси Z, V и площадь следа F. Тогда из метода импульсов (по Джонсу) [4] исходная формула для C_x запишется:

$$C_{x} = \frac{2}{S} \int_{b}^{c} \left(\int_{a}^{b} \varphi \cdot dy \right) dy' = \frac{2}{S} \int_{b}^{c} F \cdot dy$$
⁽²⁾

Интегрирование вдоль оси *X*, *Y* или *Z* проводится поочередно по всей ширине спутного следа за исследуемым звеном манипулятра.

Значения подынтегральной функции $\varphi(y)$ подсчитываются для разных экспериментальных точек сечения спутного следа. В расчетах на ПЭВМ зависимость

функции $\varphi = f(y)$ на мониторе представляется в реальном масштабе времени в графической форме (см. рис. 3).

Вычисление величины интеграла, входящего в формулу (2) производится подпрограммой на базе Excel способом «графического интегрирования». Причем графическая функция $\varphi = f(y)$ по своей физической сущности является дефектом скорости полного (динамического) давления за исследуемым объектом $V_i = f(Z_i)$, примеры таких не «обработанных» графиков показаны на рис. 4.



Рис. 4. Общий вид экспериментальных графиков $V_i = f(Z_i)$, (правая часть; левая часть графиков идентична правой)

Потери напора потока в спутном следе измеряются манометрическим способом в разных сечениях вдоль всего исследуемого манипулятора. Построив графические экспериментальные кривые $\varphi = f(X)$ для разных сечений манипулятора по размаху спутного следа, и замерив величины площади *F*, ограниченной этой кривой и осью *Z*, получаем график F=F(Z).

Обозначив площадь ограниченную экспериментальной кривой графика и осью Z через величину Ω , получим зависимость

$$\int_{b}^{c} F dZ = \Omega = \frac{\Omega[\hat{\mathbf{i}}^{2}]}{\alpha' \cdot \beta'},$$

где α' и β' - соответствующие коэффициенты графического масштабирования экспериментальной кривой.

Коэффициент профильного сопротивления всего исследуемого объекта будет равен

$$\tilde{N}_{x} = \frac{2}{S} \cdot \frac{\Omega[\tilde{\mathbf{i}}^{2}]}{\alpha' \cdot \beta'}$$
(3)

где S - площадь исследуемого объекта (или в нашем случае: отношение l/d - длины к диаметру исследуемого одиночного звена манипулятора НПА);

 Ω - площадь эпюры, ограниченная кривой дефекта полного давления (скорости) потока $\varphi(y) = f(Y)$.

Для нашего случая, учитывая выражение (3), расчетная формула определения коэффициента профильного сопротивления манипулятора НПА запишется:

$$\tilde{N}_{xi} = \frac{2}{l/d} \cdot \frac{S_{\dot{y}i}}{Z \cdot X} \tag{4}$$

где *l/d* – характеристика исследуемого объекта, т. е. отношение - длины к диаметру одиночного звена манипулятора НПА;

 S_{ii} – площадь эпюры, ограниченная кривой: $\varphi(X) = f(Z)$ дефекта полного давления (скорости) потока V_i .

На рис. 5 показано полученное семейство экспериментальных кривых $V_i = f(Z_i)$ для пространственного положениях звена манипулятора, при $Q_i^0 = 90^0 - 12^0$ и являющимися промежуточными графическими данными для процедуры расчета экспериментального коэффициента C_{xi} сопротивления манипулятора НПА.

В многофакторном опыте экспериментальные коэффициенты C_{xi} рассчитывались по выражению (4) для различных углов атаки Q_i^0 положения манипулятора к набегающему потоку. В расчетах использовались из экспериментальных кривых (см. рис. 5) площади эпюр S_{3i} . (табл. 2), представляющие дефект скорости V_i .в спутном следе за цилиндрическим звеном манипулятора НПА.

Таблица 2. Площади эпюр дефекта скорости за манипулятором НПА при $Q_i^0 = 90^0 - 12^0$

\mathbf{Q}^{0}	90 ⁰	75^{0}	60^{0}	45^{0}	40^{0}	38 ⁰	35 ⁰	30^{0}	27^{0}	22^{0}	17^{0}	12^{0}
S_{j}	2,226	2,315	2,182	1,515	1.255	1,106	0,898	0,675	0,412	0,285	0,283	0,158



Рис. 5. Экспериментальные кривые профиля скоростей в следе за цилиндрическим манипулятором НПА при угле атаки к потоку Q_i⁰:

1 -
$$Q^0 = 90^0$$
; 2 - $Q^0 = 75^0$; 3 - $Q^0 = 60^0$; 4 - $Q^0 = 45^0$; 5 - $Q^0 = 40^0$; 6 - $Q^0 = 38^0$;
149

7 -
$$Q^0 = 35^0$$
; 8 - $Q^0 = 30^0$; 9 - $Q^0 = 27^0$; 10 - $Q^0 = 22^0$; 11 - $Q^0 = 17^0$; 12 - $Q^0 = 12^0$;

Площади эпюр (см. табл. 2) получены методом графического интегрирования (4) экспериментальных кривых профиля скоростей в следе за цилиндрическим звеном манипулятора НПА при азимутальных углах атаки в потоке $Q_i = 12^0 - 90^0$.

В табл. 3 представлены полученные из опытов, для различных пространственных положений Q_i в набегающем потоке, коэффициенты сопротивления C_x одиночного звена манипулятора НПА. Эти коэффициенты также рассчитаны по ключевой формуле (4).

Таблица 3. Коэффициенты сопротивления звена манипулятором НПА при $Q_i^0 = 90^0 - 12^0$

\mathbf{Q}^{0}	90 ⁰	75^{0}	60^{0}	45 ⁰	40^{0}	38 ⁰	35 ⁰	30 ⁰	27^{0}	22^{0}	17^{0}	12^{0}
C_x	0,89	0,894	0,756	0,433	0,322	0,273	0,204	0,135	0,0749	0,0428	0,0331	0,0126

На рис. 6 приводятся результаты серии экспериментальных аэродинамических исследований в набегающем потоке коэффициента сопротивления C_x одиночного цилиндрического звена манипулятора НПА с отношением l/h = 10, по числу Re = $1,5 \cdot 10^6$; для азимутальных углов атаки Q_i = $12^0 - 90^0$.



Рис. 6. Результаты экспериментальных исследований коэффициента сопротивления C_x одиночного цилиндрического звена манипулятора НПА при азимутальных углах атаки к набегающему потоку $\angle Q^0_i = 12^0 - 90^0$

Полученные результаты полного сопротивления манипулятора (см. рис. 6) обязательны в заключительных расчетах соотношения сил и моментов, действующих на однозвеньевой цилиндрический манипулятор НПА. Также данные результаты могут быть использованы для построения рекуррентного алгоритма, с помощью которого может быть решена обратная задача динамики и для многостепенного манипулятора НПА, произвольно перемещающего в водной среде и состоящего из нескольких звеньев.

Следует отметить, что актуальным в процессе всех аэродинамических измерений оставалось требование уменьшения погрешностей измерений. Анализ причин появления погрешностей измерений, выбор способов их обнаружения и уменьшения являлся одним из основных этапов процесса измерений на измерительном комплексе в аэродинамическом эксперименте.

Погрешности измерений принято делить на систематические и случайные [2]. В процессе измерений эти погрешности проявляются совместно и образуют нестационарный случайный процесс. Деление погрешностей на систематические и случайные относительное,

и является удобным приёмом для анализа и разработки методов уменьшения их влияния на результат измерения.

Погрешность средства измерения, например, «U» - образного дифференциального жидкостного микроманометра, различается по характеру проявления ошибок также на систематические и случайные. По способу проявления погрешностей на: абсолютные, относительные и приведенные погрешности. Относительные погрешности, обычно отнесенные к условно принятому значению величины, постоянному во всем диапазоне измерений, например, к последнему делению шкалы прямо показывающего прибора. Погрешности по отношению к условиям применения проявляются как – основные и дополнительные. По отношению к изменениям во времени измеряемой величины – динамические, возникающие дополнительно при измерении переменной величины и обусловленные несоответствием реакции средства измерения на частоту (пульсацию) изменения входного сигнала давления столба жидкости в пьезометре микроманометра. Статические – погрешности средства измерения, применяемого при измерении величины, принимаемой в данных измерениях за неизменную величину.

Заметим, что общие в процентах, приборные погрешности основных вышеуказанных средств измерений в настоящем эксперименте учтены следующими величинами:

– для измерителя приемника динамического и статического давлений $\Delta \approx 5\%$;

– для «U» - образного дифференциального жидкостного микроманометра $\Delta \approx 3\%$.

Для оценки точности результата аэродинамических измерений, согласно современной теории ошибок, в исследованиях выполнена статистическая обработка результатов экспериментальных измерений относительной скорости потока в следе за одиночным звеном

измерений относительной скорости потока в следе за одиночным звеном манипулятора НПА (см. рис. 5). Результаты обработки некоторых измерений представлены в табл. 4.

№ точки	№ 1	изме <i>мм</i> е	ерени 30д. с 3	ия ∆ <i>Р</i> ст. 4	ⁿ , 5	М.О. ΔP _n , мм. вод. ст.	Дис- пер- сия σ ²	Доверит. интервал, мм. вод.ст. $\overline{X} \pm \Delta X$	Средн. квадр. отклон. <i>о</i>	Относит. погрешн., % ±ДХ/Х	Скор. ບົ
						13,2	0,2	13,2±0,561	0,447	4,254	14,518
						19,2	0,2	19,2±0,561	0,447	2,925	17,552
						25	0	25	0	0	20,133
						30,2	0,2	30,2 <i>±</i> 0,561	0,447	1,859	22,055
						37	0,5	37 <i>±</i> 0,888	0,707	2,4	24,493
						41	0	41	0	0	25,783
						43,8	0,2	43,8±0,561	0,447	1,282	26,710
						47,2	0,2	47,2 <i>±</i> 0,561	0,447	1,189	27,606
						48,8	0,2	47,8±0,561	0,447	1,175	27,898
						49	0	49	0	0	28,187

Таблица 4. Статистическая обработка результатов измерений относительной скорости потока в следе за звеном манипулятора диаметром 0,05м с отношением l/d = 10

В настоящем аэродинамическом вычислялись при косвенных измерениях.

эксперименте

все

определяемые величины

При косвенных измерениях определяемая величина вычисляется по данным прямых измерений других величин (см. табл. 1), с которыми она связана функциональной зависимостью (см. рис. 3).

В опыте погрешности измерений были обусловлены погрешностями измерительных приборов и погрешностями визуальных наблюдений. Как правило, первые относятся к систематическим погрешностям, а вторые - к случайным.

Из табл. 4 видим, абсолютная погрешность результата экспериментальных аэродинамических измерений зависит:

- от величины абсолютных ошибок, допущенных при прямых измерениях;

 от вида функции, при помощи которой косвенно измеряемая величина выражается через величины, определяемые прямыми измерениями.

В табл. 4 показана статистическая обработка 10 экспериментальных точек, хотя обработка результатов измерений относительной скорости потока в следе за звеном манипулятора диаметром 0,05м выполнялась по 49 экспериментальным точкам (в табл.4 не показано).

Из анализа величин погрешностей (см. табл. 4) понятно что, для одного и того же значения надежности α = 0,9, отклонение результата измерений от истинного значения измеренной величины незначительно.

В качестве вывода следует, что итогом многофакторного аэродинамического эксперимента по изучению закономерностей возникновения силы сопротивления за одиночным цилиндрическим звеном манипулятора НПА, является построение экспериментальных графиков $V_i = f(Z_i)$ дефекта скорости потока в спутном турбулентном следе (см. рис. 4, 5) [4]. А заключительным результатом, после обработки графиков измерений $\angle Q_i^0 = f(F)$, является результирующий график $C_{xi} = f(Q_i^0) - коэффициентов$ сопротивления одиночного цилиндрического звена манипулятора НПА (см. рис. 6).

Литература

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. – М.: ЭКОЛИТ, 2011. – 720 с.

2. Брянский Л.Н., Дойников А.С. Краткий справочник метролога: Справочник. – М.: Изд. стандартов, 1991. – 79 с.

3. Куафе Ф. Взаимодействие робота с внешней средой. М.: Мир, 1985. – 285 с.

4. Мартынов А.К. Экспериментальная аэродинамика. – М.: 1958. – 348 с.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА РАБОЧЕГО КЛАССА

А.С. Куценко, С.А. Егоров, А.В. Молчанов

НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, дом 5, стр. 1, тел/факс (499)263-61-15, e-mail: sm42@sm.bmstu.ru

В докладе рассмотрены особенности модернизации информационно-управляющей системы телеуправляемого подводного аппарата рабочего класса, созданного в 90-х годах в НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана и прошедшего модернизацию в последние годы.

В 90-х годах в НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана был создан телеуправляемый подводный аппарат (ТПА) рабочего класса. Информационно-управляющая система (ИУС) данного аппарата состояла из следующих вычислительных модулей:

- основной бортовой вычислительный модуль, отвечающий за обработку алгоритмов информационно-измерительного комплекса (ИИК) и системы управления. В ИИК входили следующие датчики: впередсмотрящий и внизсмотрящий эхолоты с выходным 12-ти разрядным параллельным кодом и аналоговый датчик глубины на базе тензометрического датчика давления серии Д;

- модуль бесплатформенной системы ориентации (БСО), построенный на базе инерциального измерительного блока с динамически настраиваемыми гироскопами. Информационный обмен между модулем БСО и основным модулем осуществлялся по интерфейсу RS-232;

- модуль системы видеостабилизации (CBC), отвечающий за определение линейных перемещений аппарата относительно дна по данным внизсмотрящей видеокамеры. Информационный обмен между основным модулем и модулем CBC осуществляется по каналу Ethernet.

Структура бортовой и пультовой ИУС выглядела как показано на рис. 1.



Рис. 1. Структура ИУС ТПА до модернизации

Ввиду давности разработки аппарата часть датчикового оснащения ТПА либо вышла из строя, либо не отвечала требованиям по точности, времени готовности к работе, ввиду чего было принято решение о модернизации ИУС ТПА. Однако с целью уменьшения изменений,

вносимых в отработанную аппаратно-программную часть комплекса, требовалось сохранить существующие интерфейсы заменяемых компонентов и существующее программное обеспечение бортового и пультовых вычислительных модулей. В результате, модернизация включила в себя:

- замену внизсмотрящего эхолота более современным эхолотом PSA916 (фирма Teledyne Benthos, США);

- замену датчика глубины на более точный цифровой датчик D10 (фирма WIKA, Германия). При этом, для обработки сигналов с датчика глубины и эхолота в основной бортовой вычислительный модуль был установлен дополнительный вычислитель на базе одноплатной ЭВМ формата PC104 Helios, имеющей на своем борту 4 последовательных порта, 24 цифровых канала ввода-вывода, 16 каналов 16 битного АЦП и 4 канала 12 битных ЦАП. Таким образом, данный модуль отвечал за преобразование цифровых интерфейсов новых датчиков (RS232) в интерфейсы старых датчиков (12 разрядный параллельный код эхолота и аналоговый сигнал датчика глубины), заводимые в основной бортовой вычислительный модуль;

- замену старой БСО новой, построенной на базе цифрового электромагнитного компаса ТСМ-ХВ (фирма PNI, США) и инерциального измерительного блока AIST-350 (фирма iSense, Россия), включающего в свой состав триаду микромеханических гироскопов, триаду микромеханических акселерометров и имеющего систему термостабилизации. Данные датчики подключались к вычислительному модулю на базе второй ЭВМ Helios, так же осуществляющей информационный обмен по интерфейсу RS232 с основным бортовым вычислительным модулем, по протоколу предыдущей системы ориентации;

- замену старого канала связи между бортовой и пультовой ИУС ТПА новым каналом связи на базе модулей HP52 (фирма Dynamix, Украина), обеспечивающих передачу Ethernet интерфейса по коаксиальной линии, что, в свою очередь, обеспечило возможность создания единой Ethernet сети, объединяющей все вычислители комплекса. При этом для сохранения старого интерфейса RS232 между основным бортовым вычислительным модулем и пультом управления ТПА было принято решение поставить преобразователи последовательного интерфейса в Ethernet NPort 5110A (фирма MOXA, США);

- замену впередсмотрящего эхолота гидролокатором секторного обзора Super Seaking (фирма Tritech, Англия), имеющего последовательный интерфейс RS232. При этом гидролокатор подключался к преобразователю NPort 5110А, подсоединенному к бортовому Ethernet коммутатору, объединенному посредством нового информационного канала с пультовым Ethernet коммутатором. В свою очередь, в пультовой части комплекса был установлен отдельный панельный компьютер под управлением операционной системы Windows с установленным на него штатным программным обеспечением фирмы Tritech для обработки и отображения информации с гидролокатора;

- замену старого модуля CBC на новый, построенный на базе ЭВМ формата PC104+ PCM-3362 (фирма Advantech, Тайвань), с доработанными алгоритмами обработки, что позволило повысить точность системы и частоту обновления данных.

Структура бортовой и пультовой ИУС после модернизации показана на рис. 2.



Рис. 2. Структура ИУС ТПА после модернизации

Все заменяемые компоненты отдельно были отработаны в лабораторных условиях с использованием стендового оборудования. После их интеграции в состав ТПА и комплексных лабораторных испытаний, были проведены настройка контуров системы управления и испытания аппарата в бассейне в целом, показавшие полную работоспособность модернизированной ИУС.

Таким образом, удалось полностью сохранить основную аппаратно-программную структуру информационно-управляющей системы ТПА, а изменению подверглись лишь подсистемы, требующие модификации, что позволило значительно сократить время и стоимость проведения модернизации. Текущая конфигурация ИУС позволяет удаленно (без вскрытия ТПА) производить замену программного обеспечения на всех вычислителях по каналу Ethernet.

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

А.С. Куценко, С.А. Егоров, А.В. Молчанов, К.В. Черненко

НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, дом 5, стр. 1, тел/факс (499)263-61-15, e-mail: sm42@sm.bmstu.ru

В докладе рассмотрены особенности построения программного комплекса (ПК) информационно-управляющей системы (ИУС) телеуправляемого подводного аппарата (ТПА) и основные этапы его создания.

В рамках ОКР в НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана был разработан программный комплекс для управления ТПА. Данный ПК отрабатывается как на имитаторах подсистем аппарата и носителя, так и, далее, на реальных подсистемах ТПА. Поведение самого аппарата моделируется в системе управления (СУ) при переключении ее в режим технологической отладки. Поведение лебедки имитируется на программном имитаторе лебедки, который по штатному протоколу обмена выдает все параметры в СУ верхнего уровня.

Основные этапы разработки данного ПК были следующими:

- этап проектирования, который включал в себя конкретизацию задач, поставленных перед разработчиками СУ ТПА в соответствии с техническим заданием (ТЗ) заказчика;

- первая итерация с проработкой исходных данных для реализации конкретных задач с учетом доступных на момент проектирования технологий, датчиков и прочих элементов, из которых будет состоять СУ ТПА;

- вторая итерация с уточненным составом доступных на момент проектирования технологий, датчиков и прочих элементов, из которых будет состоять СУ ТПА, достаточным для выполнения всех пунктов ТЗ. Уточняется масса изделия, габариты, число последовательных и параллельных интерфейсов, число силовых интерфейсов для управления исполнительными механизмами аппарата, наличие датчиков ориентации, глубины, эхолота, их необходимая точность и прочие характеристики СУ ТПА;

- после детальной проработки всего "железа" (габариты, масса, число вычислительных средств и датчиков в системе) прорабатывался состав программного комплекса и его функциональность в зависимости от подключенных к конкретным вычислителям (бортовым или корабельным) интерфейсов;

- анализ особенностей текущих подсистем, которые будут изготавливаться для данного изделия контрагентами заказчика;

- проектирование архитектуры программного комплекса исходя из заложенного в СУ ТПА оборудования. Этот этап начат после утверждения первых версий протоколов обмена с подсистемами контрагентов. На данном этапе окончательно были утверждены вычислительные средства, операционная система на всех вычислителях, требования к программному комплексу, используемые интерфейсы и структура всего оборудования, связанного с СУ ТПА;

- создание программ СУ, входящих в ПК, начат с детальной проработки требуемого функционала под конкретный вычислитель в зависимости от его назначения. На данном этапе выполнено распараллеливание работ, после того как общая функциональность СУ ППА распределена на несколько вычислительных средств на этапе проектирования архитектуры ПК. Разработка пультовой и бортовой частей выполнялась параллельно. Создание программы сопровождалось отладкой с помощью штатных датчиков и протоколов или их имитаторов. Например, для бортовой СУ имитатором датчиков выступала модель динамики ТПА. В дальнейшем, для бортовой СУ, после поставки самих датчиков, программное обеспечение проверялось и отрабатывалось с установкой датчиков ориентации на трехстепенной стенд (для системы ориентации) и стенд задания давления для калибровки датчика глубины;

- согласование первых версий ПК с заказчиком (интерфейсов оператора, функционального назначения органов управления). На данном этапе утверждалось окончательное видение экранов программ, через которые с СУ будет взаимодействовать оператор ТПА. После окончательного утверждения видов интерфейсов экранов возможно создание эксплуатационной документации на весь программный комплекс управления ТПА и окончательная доработка всех программ;

- доработка и отладка всего ПК на штатном оборудовании с использованием всех штатных средств, входящих в комплекс ТПА.

ПК ИУС состоит из СУ верхнего уровня и системы управления нижнего уровня. Верхний уровень СУ отвечает за автоматические режимы работы по данным о положении аппарата относительно носителя. Нижний уровень СУ отвечает за режимы стабилизации аппарата по крену, дифференту, курсу, глубине и за управление всеми исполнительными органами аппарата.

В систему управления верхнего уровня входят драйверы связи по Ethernet со всеми драйверами органов управления и программами, входящими в программный комплекс, например штатный модуль для приема информации от носителя о координатах СПА относительно носителя по данным гидроакустической навигационной системы. В состав ПК входят программы обработки сигналов с органов управления ТПА – рукоятки управления движением, выносного пульта управления, кнопок на консоли управления, программных кнопок на сенсорном экране. В СУ нижнего уровня входят драйверы связи с бортовыми подсистемами ТПА – модули связи по последовательному интерфейсу RS422/RS485 с эхолотом и акустическим лагом, системой электропитания, винтомоторными агрегатами, телевизионными камерами. Структура вычислительных средств представлена на рис. 1, на рис. 2 – вид органов управления на сенсорном экране.

В СУ ТПА входят три вычислителя на носителе и два вычислителя на борту аппарата. Такая архитектура позволяет распределять задачи между вычислителями, снижая загрузку каждого из них. Вычислитель, на котором запускается интерфейс пульта управления ТПА (рис.3), отображает текущее состояние ТПА и позволяет задавать его режимы работы.



Рис. 1. Структура вычислительных средств СУ ТПА

ТПА	твк	TBC										
Режим		сэп		ГТІ	B BK	л нсг	1	УПРАВЛЕНИЕ СЛК				
ВП	y	АСУ / ГАС	BX OCH BX PE3	0	0	0		ПЭ ПА	ABA	Р	АВАР ВКЛ	
Ручн	ой	TEXH	вых пэ па		0	0		СЛК	слк ТОРМ		ормоз	
Автом	атиз	BMA	ан слк	0	0	0		откл		1 6	выкл	
дп А	۸Л		спд-б спа		0	0			РУЧ	слеж	СТАБ	
дп с	вс		ΓΑС СΠΑ	0	0	0	вкл	выкл				
Подре	жим		ТВС СПА	0	0	0	вкл	выкл	Φ	Т	В	
ГЛУ	Ъ		НС СПА	0	0	0	вкл	выкл	CKOP -	CKOP +	0,00	
отс	T	Свет	ВМА СПА	0	0	0	вкл	выкл				
ГМ	ĸ	MO	MAPLU			ЛАГ		ДИФФ	ДЛ	ДЛ	5.0	
		СС	0.00	-		+	0.00	0.00	-	+	50	
ГА			+	+		KPEH		нос				
МЛ	1	BEPT CKOP	-	ЛЕВ	Г	IPAB	0.00	КОРМА		ПУСК	стоп	

Рис. 2. Вид органов управления на сенсорном экране



Рис. 3. Интерфейс пульта управления ТПА

Вычислитель, на котором запускается интерфейс сенсорного экрана ТПА, позволяет задавать режимы работы как для ТПА, так и для других подсистем комплекса, например, для телевизионной системы аппарата (управление телевизионными камерами, светильниками) или для лебедки. На нем так же реализована обработка органов управления ТПА (рукоятка управления движением, кнопки управления). Бортовой вычислитель связи реализует проброс всех протоколов обмена со всеми бортовыми подсистемами аппарата и носителем. Бортовой вычислитель СУ реализует алгоритмы обработки датчиков аппарата и алгоритмы системы управления локальными контурами (курс, крен, дифферент, глубина, марш, лаг). Вычислитель СУ ТПА на носителе реализует автоматические режимы управления ТПА при работающей гидроакустической навигационной системе. На вычислителях носителя все программы работают под управлением операционной системы Linux, на борту ТПА – QNX.

Достоинства разработанного ПК ТПА:

- расширяемость в зависимости от задач и наличия исполнительных органов ТПА;

- гибкость при настройке и отладке (изменение IP-адресов или портов в конфигурационном файле);

- быстрая переконфигурация с интерфейса RS422 на Ethernet и обратно (изменение типа интерфейса настраивается в конфигурационном файле). Что позволяет проводить отладку с внешними штатными системами при использовании технологического вычислителя (ноутбука) на котором запускается часть программ, взаимодействующих с отлаживаемой подсистемой.

В настоящее время ведется доработка и отладка ПК на штатном оборудовании телеуправляемого комплекса.

АНАЛИЗ ПРИВЯЗНЫХ ПОДВОДНЫХ СИСТЕМ КАК ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

А.В. Блинцов

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова. 54025, Украина, г. Николаев., пр. Героев Сталинграда, 9

Проведен анализ и выделены основные типы привязных подводных систем для выполнения работ на морском шельфе. Рассмотрены особенности ручного, автоматизированного и автоматического управления такими системами, сформулированы основные направления развития теории управления в условиях неопределенности внешних воздействий и нестационарности собственных параметров, сформулирована задача математического моделирования привязных подводных систем для синтеза и проверки эффективности систем управления.

Привязная подводная система (ППС) представляет собой инженерное сооружение для проведения подводных работ при непосредственной связи подводного аппарата (ПА) с судном-носителем (СН) с помощью кабель-троса (КТ) или обычного троса [1].

Привязные подводные системы с позиций теории автоматического управления относятся к наиболее сложным морским подвижным объектам, поскольку объединяют в единую систему взаимодействующих элементов объекты с сосредоточенными и распределенными параметрами, каждый из которых работает в условиях неопределенности.

Современные ППС представлены на рынке широким многообразием, тем не менее существуют устоявшиеся и общепринятые признаки, по которым классифицируют ППС [2, 3]: по способу перемещения под водой, по назначению, по виду носителя, по присутствию человека под водой, по способу энергообеспечения, по составу подводной части, по рабочей глубине погружения, по массе и по способу управления.

По способу перемещения под водой ППС делятся на:

- системы с самоходными ПА, которые перемещаются под водой с помощью собственных движителей;

- системы с несамоходными ПА, которые не имеют собственных движителей для перемещения под водой. Некоторые из них могут иметь систему активной ориентации и стабилизации в пространстве.

В свою очередь самоходные ПА делятся на плавающие и донные ПА. Плавающие ПА в процессе выполнения работы находятся преимущественно в водной толще или над грунтом и создают движительную силу с помощью гребных винтов, водометов, гидробионических движителей и т.п. Донные ПА перемещаются по дну с помощью колесных или гусеничных движителей, имеют ограниченную мобильность по сравнению с плавающими и применяются реже.

Несамоходные ПА делятся на опускные и буксируемые. Опускные ПА имеют отрицательную плавучесть и в процессе выполнения работы могут дрейфовать с СН или размещаться непосредственно на грунте. Буксируемые ПА (БПА) в процессе работы двигаются в толще воды за СН, движущая сила передается от СН к БПА через кабель-буксир (КБ). Буксируемые ПА оборудуются несущими поверхностями и кормовым оперением.

По назначению ППС классифицируются на поисковые, инспекционные, рабочие, добывающие, научно-исследовательские, спортивно-туристические и специальные.

Поисковые ППС используются для обследования водной толщи и донной поверхности, обнаружения и идентификации подводных объектов. Инспекционные ППС занимают промежуточное положение между поисковыми и рабочими и используются для обследования и технического осмотра подводных сооружений, подводные операции

выполняются с минимальным механическим контактом с подводными объектами. Рабочие ППС предназначены для выполнения различных подводно-технических операций на подводном объекте (сварка, резка, схват, стыковка и др.).

Добывающие ППС реализуют ту или другую подводную технологию добычи пищевых, минеральных или энергоресурсов Мирового океана.

Научно-исследовательские ППС ориентированы на решение широкого круга задач по изучению Мирового океана.

Спортивно-туристические ППС представляют собой сравнительно новый вид подводной техники и предназначены для организации подводных аттракционов и проведения любительских погружений в познавательных целях.

Специальные ППС предназначены для решения особо ответственных подводнотехнических задач при соблюдении одного или нескольких специфических требований к функциональным характеристикам ПА.

По виду носителя ППС разделяют на системы, которые работают с надводного судна, с обитаемого подводного аппарата или подводной лодки, с авиационного носителя (самолета-амфибии или вертолета), со стационарного объекта – с берега, стационарной платформы и др.

Надводное судно является наиболее распространенным носителем ППС, поскольку обеспечивает достаточную мобильность, надежность и автономность работы ППС в течение продолжительного времени (от нескольких дней до нескольких месяцев). Кроме того, надводный флот на сегодняшний день наиболее развит и распространен по сравнению с подводным и авиационным.

По присутствию человека под водой ППС делятся на необитаемые и обитаемые. В необитаемых ППС оператор и наблюдатель находятся на поверхности на посту энергетики и управления (ПЭУ), расположенном на судне-носителе (исключение составляет использование ППС с обитаемого ПА или подводной лодки). Проектирование, строительство и использование необитаемых ППС обосновано тем, что по сравнению с обитаемыми ППС риск жизни для человека сведен к минимуму.

По энергообеспечению ППС делятся на системы с кабельным энергопитанием ПА, системы с автономным энергопитанием ПА и системы с комбинированным энергопитанием ПА. Типичной схемой энергопитания является кабельный вариант, так как в этом случае достигаются минимально возможные массогабаритные характеристики ПА. Информационный обмен между ПА и ПЭК также реализуется по кабельному каналу.

По составу подводной части ППС делятся на однозвенные и многозвенные. Однозвенные ППС содержат один ПА, связанный с СН кабелем-тросом. Многозвенные ППС содержат промежуточные звенья между СН и ПА. В простейшем случае используют пригрузы для уменьшения гидродинамического сопротивления КТ. В более сложных системах могут использовать несколько промежуточных управляемых платформ.

По рабочей глубине погружения все виды подводной техники классифицируются на технику для работы на малых глубинах (до 600 м), на средних глубинах (до 2000 м), на больших глубинах (до 6000 м) и на предельных глубинах (до 11000 м). По массе подводного аппарата ППС делятся на малые (до 100 кг), средние (от 100 до 600 кг) и большие (масса ПА более 600 кг). Наибольшее количество ППС создано для работы на шельфе и малых глубинах и содержат в своем составе малые или средние ПА.

По способу управления ППС делятся на системы с ручным управлением, с автоматизированным управлением и с автоматическим управлением. Современные ПА оборудуются стабилизаторами курса и глубины и образуют автоматизированные ППС. Отдельные труды посвящены системам автоматического управления (САУ) траекторным движением ПА.

Однако нет единой теории синтеза САУ ППС как единого комплекса взаимодействующих элементов, а также теории синтеза САУ группой ППС. Выделение и

систематизация характерных признаков ППС разных конструкций, конфигураций и назначений является первым шагом по созданию единой теории синтеза САУ ППС.

Анализ современного рынка подводных работ [4] и представленной подводной техники для их выполнения показывает, что подавляющее большинство работ выполняется с применением самоходных плавающих или несамоходных буксируемых необитаемых малогабаритных ПА с кабельным энергопитанием, предназначенных для работ на морском шельфе (до 600 м). В роли СН или СБ используются в основном надводные суда от малых катеров до судов с водоизмещением больше 100 т. Автор имеет опыт применения ПА с использованием шлюпки в роли СН.

Подавляющее большинство подводных работ (кроме добывающих) выполняется однозвенными или многозвенными ППС в таких конфигурациях:

- однозвенные ППС с самоходным ПА (СПА) и надводным СН;

- однозвенные ППС с БПА и надводным или подводным судном-буксировщиком (СБ);

- двухзвенные ППС с самоходным ПА, управляемым или неуправляемым пригрузом-заглубителем;

- двухзвенные ППС с самоходным ПА и управляемым поверхностным отводителем;

- трёхзвенные ППС с самоходным ПА, управляемым или неуправляемым пригрузомзаглубителем и управляемым поверхностным отводителем;

Обозначенные конфигурации могут использоваться в совокупности с одним или несколькими СН и образовывать многоаппаратные комплексы ППС.

Современные ПА проектируются и используются как многоцелевые, т.е. способные выполнять несколько разнотипных задач. Это достигается соответствующей функциональной гибкостью основного оборудования аппарата и способностью быстрого его перенастраивания на выполнение поставленной задачи. Благодаря этому можно выделить основные элементы ППС: СПА или БПА; КТ или КБ (один или несколько); пригруззаглубитель (управляемый или неуправляемый); поверхностный отводитель; кабельная лебедка (КЛ), расположенная на СН; КЛ, расположенная на промежуточных платформах – пригрузах-заглубителях, поверхностном отводителе.

В общем случае одно- и двухзвенные ППС являются частными случаями трёхзвенной ППС.

Движение ПА может происходить как по заранее известной (заданной) траектории, так и по траектории, которая формируется в процессе эксплуатации ППС (характерно для следящих САУ). В научной литературе предложены САУ для управления пространственным движением ПА в квазистационарном режиме [5] с решением отдельные динамических задач управления [6]. Однако современные подводные технологии нуждаются в пространственном управлении траекторным движением ПА с высокими показателями качества с учетом динамически изменяемых неопределенных внешних возмущений, а также нестационарности собственных параметров ПА. Так, например, инспекционные и рабочие ПА оборудуются манипуляторами, грунтососами и другим оборудованием, которое в процессе работы генерирует сильные возмущения, которые вместе с КТ действуют на ПА.

Управляемый пригруз-заглубитель с точки зрения теории автоматического управления может представлять собой управляемую по одной, двум или трем поступательным степеням свободы платформу. Его угловая ориентация не имеет принципиального значения и не нуждается в активном управлении. Поверхностный отводитель должен располагаться в горизонтальной плоскости и может оборудоваться пассивными или активными системами гашения качки.

Ручной режим управления этими элементами требует напряженной работы операторов, поскольку внешние возмущения действуют на них одновременно от двух КТ. Автоматизация управления этими элементами необходима для увеличения качества подводных работ и усложняется повышенным влиянием внешних возмущений.

Управление КЛ предусматривает управление одной величиной – длиной выпущенной части КТ. В установившихся режимах движения эта величина обеспечивает определенную рабочую зону ПА, в динамических режимах дает возможность дополнительно уменьшать влияние внешних возмущений на ПА. В режиме ручного управления палубный работник по команде оператора ПА выполняет выпускание или подбирание КТ, а также следит за направлением схода КТ и не допускает его послабления и попадания в район гребных винтов CH. Чрезмерный выпуск КΤ приводит к увеличению его гидродинамического сопротивления и как следствие увеличения нагрузки на движительный комплекс СПА или на несущие поверхности БПА. В [2] Рекомендуется длину выпущенной части КТ L_{KTB} выбирать в зависимости от глубины $h: L_{\text{KTB}} = (2..2,5)h$. В [7] предложены более сложные алгоритмы, которые дают возможность автоматизировать выпускание/подбирание КТ по критерию минимизации нагрузки на ПА. Тем не менее, такая САУ КЛ работает в квазистационарном режиме и все равно предусматривает активное участие палубного работника в управлении КТ. Особенно внимательным нужно быть при выполнении работ на якорной стоянке СН, поскольку под влиянием ветро-волновых возмущений СН перемещается и поворачивается по некоторой неопределенной локальной траектории, что влечет за собой увеличение риска попадания КТ под СН и его запутывание в гребных винтах или вокруг якорной цепи. Введение в состав ППС поверхностного отводителя решает данную проблему. Тем не менее, задача динамического управления длиной выпущенной части в автоматическом режиме КТ остается нерешенной.

Основным инструментом исследования ППС является компьютерное моделирование, целесообразность и эффективность которого не вызывает сомнений. Разработка и программирование достоверных математических моделей элементов ППС являются актуальными задачами усовершенствования теории автоматического управления ППС – на их основе предлагается объединять отдельные элементы ППС в цельные моделирующие комплексы для исследования типичных конфигураций ППС.

Обоснование выбора входных и выходных параметров и математические модели отдельных элементов ППС представлены в докладе.

Литература

1. Морской энциклопедический справочник: в двух томах./ Под ред. Н.Н. Исанина. – Л.: Судостроение, 1986. – 1032 с.

2. Блинцов В.С., Магула В.Э. Проектирование самоходных привязных подводных систем. – К.: Наукова думка, 1997. – 140 с.

3. Ястребов В.С. Телеуправляемые подводные аппараты. – Л.: Судостроение, 1985. – 232 с.

4. Шостак В. П. Подводные аппараты-роботы и их манипуляторы. Чикаго: Мегатрон, 2011. – 134 с.

5. Блінцов О.В. Автоматизація керування електрорушійною системою прив'язного підводного робота на основі штучної нейронної мережі. // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". Ч. 7. – К.: ІЕД НАН України, 2008. – С. 54-57.

6. Блинцов С.В., Чан Там Дык. Синтез регулятора дифферента буксируемого подводного аппарата // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2012. – №3-4. – С. 58-65.

7. Павлов Г.В., Блінцов О.В. Синтез системи автоматичного керування лебідкою кабельтроса самохідної прив'язної підводної системи. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2008. – Вип. 4/2008 (51). – Частина 2. – С. 97-99.

ВОЗМОЖНОСТЬ СНИЖЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ПОДВОДНЫХ ПЛАНЕРОВ

С.Г. Щеглов

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Тел.: (423)231-21-01; E-mail: shchurov@poi.dvo.ru

В докладе рассматриваются факторы, влияющие на величину гидродинамического (лобового) сопротивления подводного планера, и рассматривается один из возможных способов снижения гидродинамического сопротивления у существующих подводных планеров.

Более десяти лет для научных исследований океанологи применяют малоразмерные автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) называемые underwater glider (подводный планер), это аппараты с системой движения основанной на изменении собственной (остаточной) плавучести и смещении центра тяжести. Наиболее интересны АНПА имеющие динамический принцип поддержания в виде крыльев. Применение крыльев уменьшает угол планирования, что в свою очередь увеличивает длину цикла (погружение - всплытие) и, следовательно, снижает потребление энергии (системой изменения плавучести и устройством смещения центра тяжести). Как результат – увеличивается автономность работы АНПА.

На сегодняшний день широко используются несколько моделей подводных планеров с динамическим принципом поддержания в виде крыльев, которые являются малоразмерными исследовательскими подводными планирующими аппаратами, не имеющими движителей. Среди них наиболее известны Scarlet Knight(Slocum), производитель Teledyne Webb Research, Seaglider paspaботчик University of Washington, Spray paspaботчик Woods Hole Oceanographic Institution, Scripps Institution of Oceanography. Данные подводные планеры имеют различную форму корпуса (от торпедообразной до удобообтекаемой), близкие массогабаритные характеристики и жестко закрепленные крылья (с плоским или симметричным профилем). Аппараты не нуждаются в специальном судне – носителе, их можно запускать с пирса или обычной моторной лодки.

Имея различную форму корпуса, различные углы планирования и различный диапазон изменения силы остаточной плавучести, при близких массогабаритных характеристиках горизонтальная скорость планеров практически одинаковая и составляет 0,25 м/с. К примеру, SeaExplorer не имеет крыльев и его горизонтальная скорость составляет 0,5 м/с.

Из аэродинамики известно, что лобовое сопротивление самолёта примерно на 50% состоит из сопротивления крыла и на 50% - из вредного сопротивления других частей самолета.

Из формулы гидродинамического сопротивления [1] следует, что для уменьшения гидродинамического сопротивления необходимо уменьшать коэффициент *C_x* и *S*:

$X = C_x \left(\rho v^2 / 2\right) S ,$

где C_x безразмерный коэффициент гидродинамического сопротивления , ρ — плотность среды, v — скорость, S — характерная площадь перпендикулярно потоку, m^2 ; для продолговатых тел вращения S принимается как функция от объёма тела: $S = V^{2/3}$.

Безразмерный коэффициент гидродинамического сопротивления C_x зависит от формы тела, его положения относительно направления движения обычно определяется экспериментально в гидродинамических опытовых бассейнах или вычисляется в CFD (Computational fluid dynamics) программах, в таких как программный комплекс FlowVision, ANSYS и др. На рис.1 – 3 приведены характеристики, полученные при помощи моделирования в программе CFD пакет FLUENT 6.3.26 на мелководье для подводного планера (рис. 1а) с жестко закреплённым крылом. Диаметр корпуса подводного планера 0,17 м, длина 1,3 м, размах крыльев 1,0 м площадью 0,04 м², максимальная глубина погружения 30 м, используемый профиль крыла NACA 0012 [2].



Рис. 1. а) модель испытуемого подводного планера; б) зависимость коэффициента C_x от скорости и угла атаки; в) зависимость коэффициента C_y от скорости и угла атаки.



Рис. 2. Диаграммы распределения подъёмной силы, создаваемой элементами подводного планера, при углах планирования -4⁰ и +4⁰.



Рис. 3. Диаграммы распределения силы гидродинамического сопротивления, создаваемой элементами подводного планера, при углах планирования -4⁰ и +4⁰.

Из диаграмм на рис. 2 и рис. 3 видно, что подъёмная сила в основном создаётся крылом, а большее сопротивление при этих же углах планирования (-4^0 и $+4^0$) дает корпус подводного планера. Угол атаки крыла подводного планера задаётся дифферентом, так как крыло (консоли) закреплено в плоскости симметрии аппарата, то по отношению к набегающему потоку корпус тоже будет под таким же углом. При симметричном обтекании подводного планера подъёмная сила равна 0, а лобовое сопротивление минимально. Следовательно, для уменьшения гидродинамического сопротивления подводного планера необходимо обеспечить симметричное обтекание корпуса, а крыло должно быть установлено с наивыгоднейшим углом атаки, при данной скорости.

Из выше сказанного следует, что жесткое крепление крыльев, с начальным углом установки ноль градусов (установочным углом называется угол между продольной осью аппарата и хордой крыла) для создания одинаковых условий обтекания жидкости при планировании вверх и вниз (погружение и всплытие), приводит к увеличению коэффициента гидродинамического сопротивления корпуса, поскольку угол планирования не совпадает с (дифферентом). Следовательно, продольной осью планера для уменьшения гидродинамического сопротивления подводного планера необходимо, чтобы угол планирования совпадал с углом дифферента аппарата, при заданном угле атаки крыла.

Для выполнения этого условия необходимо и достаточно, чтобы установочный угол крыла при планировании вниз был положительный и равный $+\alpha_{\text{опт.}}$, а при планировании вверх отрицательный и равный $-\alpha_{\text{опт.}}$.

Реализовать смену углов начальной установки крыла можно путем крепления крыла на оси вращения, проходящей за центром давления крыла, что приведет к снижению момента силы, необходимого для поворота крыла (консолей), при изменении направления набегающего потока, без применения актюаторов рис. 4. Угол вращения ограничен значениями 2α_{опт.}.



Рис. 4. Модель планера, с консолями (крылом) установленными на оси вращения.

Таким образом, установка консолей (крыла) на оси вращения, проходящей за центром давления крыла, позволит минимизировать коэффициент лобового сопротивления аппарата при оптимальном качестве крыла, то есть обеспечить планирование с минимально возможным гидродинамическим сопротивлением корпуса и крыла, в результате чего достигается максимально возможная скорость планирования при минимальной вертикальной скорости снижения, а следовательно, увеличивается горизонтальная скорость и длина цикла с большей автономностью и без дополнительных энергозатрат, по сравнению с жестко установленным крылом [3].

На рис. 5 показаны траектории движения подводного планера с различными креплениями крыла.



Рис. 5. Траектории движения подводных планеров с различными креплениями крыльев, с фиксированным крыло и с подвижным крылом.



Рис. 6. Модель планера с подвижным крылом и с различным хвостовым оперением для натурных испытаний.

Литература

1. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика /Учеб. пособ. Изд. 2-е. М., Стройиздат, 1975. 323 с.

2. Ting M.C., M. Abdul et. al. Numerical Study on Hydrodynamic Performance of Shallow Underwater Glider Platform //Indian Journal of Geo-Marine Sciences. 2012. Vol. 41 (2). P. 124-133.

3. Подводный планер (варианты). Пат. №122970 U1 РФ/ Щеглов С.Г. №2012118807; заявл. 04.05.12; опубл. 20.12.12. Бюл. № 35.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРИБРЕЖНОГО ПРОМЫСЛА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫМИ МОРЕХОДНЫМИ ВЕЗДЕХОДАМИ НА ВОЗДУХООПОРНЫХ ГУСЕНИЦАХ

А.И. Азовцев*, И.С. Карпушин**

*Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского 690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50А, тел/сотов.: 8(423)2301239,8-950-290-76-04 e-mail: Azovtsev@msun.ru

**ФБОУ ВПО «Дальрыбвтуз», Россия, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52Б, тел. сот. 8(423)271-04-63, e-mail: karpushin5@mail.ru

В докладе рассматриваются перспективы создания на Дальнем Востоке мощной биотехнологической индустрии, выпускающей продукцию из экологически чистого возобновляемого сырья круглогодичного прибрежного промысла при транспортном обеспечении хозяйств на новом принципе движения – на воздухоопорных гусеницах. Мореходные вездеходы на этом принципе движения необходимы для комплексного освоения шельфа и побережья. Обсуждаются технические проблемы создания вездеходов и промыслового оборудования.

Многолетние поисковые исследования мореходных транспортных средств на воздухоопорных гусеницах, проводимые в МГУ им. адм. Г.И. Невельского, получили оценку как разработка нового принципа движения – на воздухоопорных гусеницах, как прорыв в области внедорожного транспорта и достижение рекордных показателей по снижению гидродинамического сопротивления. Исследования инициировались Минтрансом России с целью разгрузки судов на необорудованный берег Арктики и Дальнего Востока.

Испытания самоходного крупномасштабного макета подтвердили, что воздухоопорные гусеницы являются амфибийным движителем, плавучесть которого соизмерима с опорной реакцией на грунт; в пересчете на натуру обеспечивается мореходность на волнении до четырех баллов включительно, в том числе и в прибойной полосе; транспортное средство надежно работает в битом льду с обеспечением выхода из воды на лед, не имеет крена при ходе одной гусеницей по льду другой по воде; плавно преодолеваются препятствия типа уступов и рвов, выполняет подъем на затяжные уклоны до 20⁰, надежно работает на боковом уклоне; высокая плавность хода на наледях, валунах, кочках и мелких торосах позволяет развивать скорость на таком бездорожье 30-40 км/час; эффективный способ снижения сопротивления судна – движение смоченной поверхности по направлению набегающего потока реализован при скоростях движения смоченной поверхности больше скорости набегающего потока (скорости хода), гусеница работает как эффективный движитель.

Специалисты Дальрыбвтуза обосновали необходимость и целесообразность внедрения мореходных вездеходов с такими универсальными ходовыми качествами для интенсификации развития прибрежного рыболовства и марикультуры и освоения побережья дальневосточных морей путем создания множества баз прибрежного промысла на открытом побережье без строительства портово-причальных и других гидротехнических сооружений для обеспечения безопасной стоянки промыслового флота.

Для практической реализации прогнозируемых показателей с 2009 по 2011 годы МГУ им. адм. Г.И. Невельского и Дальрыбвтуз выполнили разработку концептуальных проектов плавсредств – мореходных вездеходов на воздухоопорных гусеницах для прибрежного промысла по Федеральной целевой программе «Развитие гражданской морской техники» на 2009 – 2016 годы [1]. Шаг типоразмерного ряда соответствует двукратному отличию грузоподъемности. Для прибрежного промысла и обслуживания хозяйств марикультуры

разработаны мореходные вездеходы оптимальной грузоподъемности 20, 10 и 5 тон в зависимости от направления использования. Облик промыслового мореходного вездехода грузоподъемностью 20,0 тонн показан на рис.1.



Рис.1 Облик универсального промыслового судна на воздухоопорных гусеницах «ПСВГ-20Пром».

Между двумя гусеницами расположена промысловая площадка, на которой может размещаться двадцатифутовый контейнер со сменным промысловым оборудованием. Промысловые операции могут выполняться через бортовые и/или носовые и кормовые аппарели ПСВГ. При необходимости, например, для сбора штормовых выбросов оборудование может навешиваться на бортовые ограждения промысловой площадки.

Принципиальное устройство воздухоопорной гусеницы показано на схеме рис.2 на продольном разрезе вездехода грузоподъемностью 20,0 тонн.



Рис.2 Схема продольного разреза промыслового судна г/п 20 тонн.

Гусеница выполняется из широкой транспортной ленты с легкими надувными грунтозацепами (плицами) на ее внешней поверхности. Лента заведена на приводные барабаны столь большого диаметра, что во внутренней ее полости размещается понтон с механическим оборудованием.

Под днищем понтона создается воздушная подушка, опирающаяся на нижнюю ветвь гусеницы. Между двумя такими гусеницами расположена промысловая платформа. Равномерно распределенное давление на грунт позволяет обеспечить грузоподъемность до 60 т при щадящем воздействии на грунт тундры.

Привлекательна гипотеза снижения горба волнового сопротивления за счет того, что гусеница движется быстрее транспортного средства, подтягивает под себя встречный поток, что может снизить влияние подпорной волны при выходе на режим глиссирования.

Высокая эластичность воздухоопорных гусениц и надувных плиц на гусеницах дают основание предполагать повышение мореходности на встречном волнении в сравнении с транспортными средствами на воздушной подушке. Эффект достигается тем, что встречная волна бьет по надувным плицам, движущимся по направлению набегания волны.

Предварительными испытаниями обосновано, что при числах Фруда по длине опорной части гусеницы от 0,30 до 0,45 сопротивление гусеницы в 2 – 3 раза меньше волнового сопротивления воздушной подушки при равных силах поддержания.

Использован метод DNTSRDC [2] в предположении, что воздействие на воду вертикальных сил наибольшей интенсивности для широкой воздухоопорной гусеницы сходно с воздействием воздушной подушки скегового судна. При этом учтено, что влияние сопротивления трения пренебрежимо для рассматриваемой воздухоопорной гусеницы.

Определяемая данным методом с использованием параметров прототипа зависимость относительного сопротивления от скорости транспортного средства на воздухоопорных гусеницах представлена на графике рис.3.



Рис. 3. Зависимость сопротивления от скорости мореходного вездехода на воздухоопорных гусеницах: R – сопротивление, кг; Δ – водоизмещение вездехода, кг; $Fr_{LW} = \upsilon / \sqrt{g \times L_W}$ – число Фруда: υ – скорость, м/с; L_W – длина опорной части гусеницы, м

Прогнозирование потребной мощности *N* для движения вездехода на воде выполняется по следующей зависимости:

$$N = \left(\frac{R}{\Delta}\right) \times \Delta \times \frac{\upsilon}{102 \times \eta}, \text{ KBT},$$

где η – КПД воздухоопорной гусеницы.

Например, для вездехода водоизмещением 80 т при скорости на тихой воде 40 узл. (20,6 м/с) с учетом прогноза КПД – 50% потребная мощность равна N = 0,30x80000x20,6/(102x0,5) =970 кВт, что ориентировочно в три раза меньше мощности силовой установки глиссирующего теплохода проекта А-145 Зеленодольского завода [3] при приблизительно равных водоизмещении и скорости хода.

Перспективность разработки скоростных мореходных вездеходов на воздухоопорных гусеницах определяется преимуществами по сравнению с судами на воздушной подушке и на подводных крыльях, при эксплуатации на пересеченной местности, в условиях льда, преимуществами в экономичности и экологичности. Качества и преимущества мореходных вездеходов более детально описаны в опубликованной работе [4]. Фундаментально обоснована эффективность развития прибрежного промысла на обширном открытом побережье Японского и Охотского морей. Обеспечение круглогодичного промысла удваивает добычу сырца, а беспричальная эксплуатация вездехода обеспечит возможность увеличения баз прибрежного промысла и марикультуры в десятки раз. Выход высокотехнологичной продукции из сырья прибрежного промысла и марикультуры с малой долей транспортной составляющей в его себестоимости можно увеличить в 20 раз.

Применительно к предлагаемым вездеходам концептуально разработаны:

1. Способ ярусного лова на мелководных акваториях. Обеспечивается безопасный выход на обширное мелководье шельфа.

2. Способ прибрежного лова ставными и буксируемыми сетными орудиями лова.

3. Промысел гидробионтов ловушками.

4. Технология строительства и обслуживание плантаций марикультуры.

5. Способ сбора штормовых выбросов морских водорослей.

В соответствии со стандартами проектирования – очередной этап разработки промыслового вездехода включает разработку технического предложения и техническое проектирование вездехода и специализированной промысловой оснастки. МГУ им. адм. Г.И. Невельского и Дальрыбвтуз продолжают разработки инициативно, что затруднено отсутствием финансирования. По нашим разработкам получено более десятка патентов, выполняется патентование за рубежом.

Литература

1. Азовцев А.И., Огай С.А., Москаленко О.В. Разработка типоразмерного ряда мореходных вездеходов на воздухоопорных гусеницах для комплексного освоения побережья и замерзающего шельфа// Научный журнал «Морские интеллектуальные технологии», спецвыпуск №1, 2013. С-Пб. С. 34-37.

2. Роберт А. Вильсон, Стивен М. Уэльс, Чарльз Е. Хобер Мощностное прогнозирование для судов на воздушной подушке, основанное на результатах модельных испытаний (DNTSRDC). David W. Taylor Naval ship research and development center. USA.5. Bunch J. Rose D (Eds.) Sparse matrix computations. – New York – San Francisco –London: Academik Press. 1976.

3. Мистахов Р.И. В режиме полета над волнами// Наука и транспорт. Морской и речной транспорт. «Транспорт Российской Федерации», 2011. С.51.

4. Азовцев А.И., Огай С.А., Москаленко О.В. Прорыв в области внедорожного амфибийного транспорта// Наука и транспорт. Морской и речной транспорт. «Транспорт Российской Федерации», 2011. С.48-50.

МЕТОДЫ НАВЕДЕНИЯ СУДНА И ПЕЛАГИЧЕСКОГО ТРАЛА НА ПОДВИЖНЫЙ ОБЪЕКТ

С.Г. Фадюшин

ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет». 690950, г. Владивосток, ул. Суханова, д.8, тел.: (423) 2220830 e-mail: fadyushinsg@yandex.ru

В докладе рассматриваются методы наведения судна и пелагического трала на подвижный объект, в качестве которого принято скопление рыбы (косяк). Поставлена задача наведения трала и дана краткая характеристика методам наведения. Исследование выполнено при поддержке Программы «Научный фонд» ДВФУ.

С точки зрения кинематики наведение пелагического трала на подвижной объект в плоскости горизонта – это задача об определении координат точки пересечения траектории трала и подвижного объекта. При проведении исследований по данной теме в качестве подвижного объекта чаще всего рассматривается скопление рыбы (косяк), движущийся в определённом направлении и с определённой скоростью [2,3]. В настоящей работе понятие подвижного объекта конкретизируется и в качестве такового также принят косяк рыбы. Рассмотрим принципиальные основы решения задачи наведения в общем случае, когда после определения элементов горизонтального перемещения косяка K_p и V_f судно следует произвольным курсом K_c со скоростью V_s . Предположим, что в некоторый момент времени судно, идущее этим курсом, находится в точке C_0 , а центр плотности косяка, перемещающегося по направлению K_p со скоростью V_f , находится в точке K_0 в соответствии с рис. 1.



Рис. 1. Наведение трала на подвижный косяк в плоскости горизонта
Положение центра плотности косяка относительно судна определяется пеленгом Π и расстоянием D, а положение трала относительно судна в точке O'_0 – курсовым углом $Q_{\rm T}$ и горизонтальным отстоянием x.

Для облова подвижного косяка судно в точке C_0 ложится на курс траления K_{T} . Поставленная задача будет решена, если курс траления обеспечит встречу устья трала с центром плотности косяка в точке $O'_1(K_1)$ с координатами d_N и d_E .

Следовательно, условие встречи трала с центром плотности косяка – это равенство координат:

$$egin{array}{lll} d_{N_{ ext{T}}} &= d_{N_{ ext{K}}}, \ d_{E_{ ext{T}}} &= d_{E_{ ext{K}}}. \end{array}$$

Как видно из рис. 1:

$$\begin{cases} d_{N_{\rm K}} = D \cos \Pi + V_f t_{\rm T} \cos K_{\rm p}; \\ d_{N_{\rm T}} = V_S t_{\rm T} \cos K_{\rm T} + x \cos (K_{\rm T} + Q_{\rm T}^{\rm K}); \\ d_{E_{\rm K}} = D \sin \Pi + V_f t_{\rm T} \sin K_{\rm K}; \\ d_{E_{\rm T}} = V_S t_{\rm T} \sin K_{\rm T} + x \sin (K_{\rm T} + Q_{\rm T}^{\rm K}), \end{cases}$$
(1)

где $t_{\rm T}$ – время следования судна курсом траления $K_{\rm T}$ до выхода трала на центр плотности косяка (время сближения); $Q_{\rm T}^{\kappa}$ – курсовой угол с судна на трал в момент встречи трала с центром плотности косяка (конечный курсовой угол).

На основании выражений (1) можно написать

$$\begin{cases} D \cos \Pi + V_f t_{\rm T} \cos K_{\rm K} = V_S t_{\rm T} \cos K_{\rm T} + x \cos(K_{\rm T} + Q_{\rm T}^{\rm K}), \\ D \sin \Pi + V_f t_{\rm T} \sin K_{\rm K} = V_S t_{\rm T} \sin K_{\rm T} + x \sin(K_{\rm T} + Q_{\rm T}^{\rm K}), \end{cases}$$
(2)

Уравнения (2) содержат три неизвестных: К_т, *t*_т и *Q*^к_т. Поэтому для их решения необходимо задать метод наведения судна на подвижный объект.

По характеру связи между вектором скорости судна и линией пеленга на объект маневра все методы наведения можно разделить на две группы:

1. Методы с фиксированным положением требуемого направления вектора скорости относительно линии пеленга (метод погони, метод постоянного угла упреждения).

2. Методы с изменяющимся положением требуемого направления вектора скорости относительно линии пеленга (метод параллельного сближения и метод пропорционального сближения).

Выбор метода наведения необходимо производить с учетом ряда требований:

1. Метод наведения должен обеспечивать наименьшую кривизну траектории судна, особенно в районе точки встречи с объектом маневра.

Кривизна кинематической траектории в районе точки встречи влияет на величину ошибок наведения судна. Следовательно, уменьшение кривизны кинематической траектории по мере приближения судна к цели – одно из существенных требований к методу наведения.

2. Метод наведения должен обеспечивать выход судна на объект маневра во всем возможном диапазоне скоростей и направлений движения объекта.

3. Метод наведения должен обеспечивать требуемую точность сближения судна с объектом в различных гидрометеорологических и навигационных условиях.

4. Метод наведения должен быть достаточно простым в смысле его реализации.

Основное из требований – обеспечение заданной точности наведения при ограниченных возможностях судна по радиусу циркуляции.

Известны следующие методы наведения [1, 4].

Метод погони. Методом погони называется такой метод наведения, при котором в каждый момент времени вектор скорости судна направлен на объект маневра.

При наведении судна по методу погони управляющий сигнал пропорционален величине угла упреждения (угла между вектором скорости судна и линией пеленга на объект), который является здесь параметром рассогласования.

Если принять, что угол дрейфа судна при движении по криволинейной траектории (β) при сближении имеет малую величину, то при условии $\beta = 0$ управляющий сигнал будет пропорционален величине курсового угла на объект. В этом случае КУ = 0° и является параметром рассогласования.

Метод наведения с постоянным углом упреждения. Методом наведения с постоянным углом упреждения называется такой метод, когда требуемое движение судна определяется условием, при котором в течение всего времени движения судна до точки встречи угол между вектором скорости судна и линией пеленга на объект (угол упреждения) остается постоянным. Параметром управления является разность измеренного и заданного значений угла упреждения.

Если принять, что β = 0, то управляющий сигнал будет пропорционален величине разности измеренного и заданного курсового угла. В этом случае при наведении КУ = const.

Метод параллельного сближения. Методом параллельного сближения называется такой метод наведения, при котором в течение всего времени движения судна до точки встречи линия пеленга на объект маневра остается параллельной заданному направлению.

Уравнение метода:

$$\Pi = \Pi_0 = \text{const.}$$

При наведении судна по методу параллельного сближения требуемое значение угловой скорости линии пеленга на объект равно нулю ($\dot{\Pi} = 0$).

Метод пропорционального сближения. Методом пропорционального сближения называется метод наведения, при котором в течение всего времени движения судна угловая скорость поворота вектора скорости судна остается пропорциональной угловой скорости линии пеленга на объект.

$$\dot{K}_{c} = b\dot{\Pi},$$
(3)

где \dot{K}_c – скорость изменения курса судна; *b* – коэффициент пропорциональности (навигационная постоянная).

Кинематические траектории метода пропорционального сближения могут быть представлены семейством кривых, расположенных между траекториями метода погони и метода параллельного сближения в соответствии с рис. 2.



Рис. 2. Траектории метода пропорционального сближения 1 – траектория метода погони; 2 – траектория метода пропорционального сближения; 3 – траектория метода параллельного сближения

Для реализации метода пропорционального сближения необходимо в каждый момент времени измерять угловую скорость линии пеленга на косяк и сравнивать ее с угловой скоростью вращения вектора скорости судна.

Ошибка наведения определяется как разность:

$$\Delta = b \dot{\Pi} - \dot{K_{c}}.$$

Для вывода уравнений, описывающих движение судна при наведении по методу пропорционального сближения, проинтегрируем уравнение (3). В результате получим:

$$\mathbf{K}_{\mathbf{c}} = b\Pi + C,\tag{4}$$

где С-постоянная интегрирования

 $C = \mathcal{K}_{c_0} - b\Pi_0.$

Тогда с учётом того, что КУ = П – К_с, решая совместно уравнения (4) и описывающие движение судна относительно объекта маневра в плоскости горизонта

$$\frac{dD}{dt} = \dot{D} = V_f \cos \Pi - V_s \cos KY;$$
$$D\frac{d\Pi}{dt} = D\dot{\Pi} = V_f \sin \Pi - V_s \sin KY,$$

получим уравнения кинематической траектории судна, наводимого на подвижный объект методом пропорционального сближения:

$$\dot{D} = V_f \cos \Pi - V_s \cos \left[(1 - b)\Pi + K_{c_0} - b\Pi_0 \right];$$
(5)

$$D\dot{\Pi} = V_f \sin \Pi - V_s \sin[(1-b)\Pi + K_{c_0} - b\Pi_0].$$
 (6)

Таким образом, метод пропорционального сближения является обобщением рассмотренных методов сближения. Задавая определённые значения начальным условиям и навигационной постоянной, можно получить один из перечисленных видов сближения. Кинематика наведение судна и пелагического трала на подвижной объект в плоскости горизонта описывается уравнениями (2, 5, 6). Положение трала в горизонтальной плоскости контролируется курсовым углом $Q_{\rm T}^{\kappa}$, который рассчитывается по уравнениям (2). При таком способе наведения пелагического трала на подвижный объект в плоскости горизонта сближение осуществляется в два этапа. На первом этапе судно, используя один из методов наведения, сближается с объектом маневра. На втором этапе судно наводит на объект трал.

Литература

1. Канн В. Л., Кельзон А. С. Теория пропорциональной навигации. – Л. : Судостроение, 1965. – 423 с.

2. Ольховский В. Е. Навигация и промысловая навигация: учебник. М. : Пищ. пром-сть, 1979. – 544 с.

3. Ольховский В. Е. и др. Математическое обеспечение автоматизации тралового и кошелькового лова / В. Е. Ольховский, В. И. Яковлев, В. И. Меньшиков. – М. : Пищ. промсть, 1980. – 168 с.

4. Фадюшин С. Г. Промысловая навигация. Управление системой «судно – орудие лова» : монография / С.Г. Фадюшин, М.Е. Барышко, В. Ф. Вареников. – Владивосток : Издательский дом Дальневост. федерал. ун-та, 2012. – 288 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЯГОВО-СЦЕПНЫХ СВОЙСТВ ЩАГАЮЩИХ МАШИН НА ПОДВОДНЫХ ГРУНТАХ С НИЗКОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ^{*}

В.В. Чернышев

Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ) 400005, Волгоград, пр. Ленина, 28, тел. (8442) 24 80 99, факс (8442) 24 81 13, e-mail: dtm@vstu.ru

В докладе обсуждаются результаты исследований по определению тягово-сцепных свойств и предельной грунтовой проходимости шагающих машин в подводных условиях. Исследования проводились на базе шагающего робота «Восьминог». Показано, что на подводных слабонесущих грунтах шагающие машины превосходят по тяговым свойствам и проходимости традиционные транспортные средства с колесными и гусеничными движителями.

Важная роль среди машин для освоения морского дна отводится донным агрегатам, несущим на себе добычные и геологоразведочные рабочие органы в виде рыхлителей, ковшей, подборщиков, отвалов, грунтовых насосов и т.п. Практика подводно-технических работ также ставит целый ряд задач, связанных с проведением грунтовых работ (равнение площадок на дне, подготовка траншей для закладки в них трубопроводов и кабелей и др.). Все эти работы требуют значительной мощности используемых машин и создаваемых ими при работе тяговых усилий на рабочий инструмент. В качестве средств передвижения по дну уже используются гусеничные и колёсные машины. Однако условия эксплуатации, характеризующиеся низкой несущей способностью грунтов и сложным рельефом поверхности дна, делают малопригодными традиционные типы движителей. Более подходящим для эксплуатации в условиях морского дна представляется шагающий движитель. Шагающие машины обладают более высокими возможностями по грунтовой и профильной проходимости. Также имеет место снижение затрат тягового усилия на сопротивление движению — для шагающих движителей, в отличие от колесных и гусеничных, грунт не является препятствием для передвижения, а лишь требует необходимых затрат мощности на его прессование. На рис. 1 приведена схема сил действующих в курсовом направлении на колесную, гусеничную и шагающую машину при движении, где *F*_{*mяги*} — сила тяги, идущая на совершение полезной (тяговой) работы; *F*_{*сцепл*} сила сцепления; F_{conp.} — сила сопротивления движению со стороны грунта; R_{воды} — сила гидравлического сопротивления воды.



Рис. 1. Силы действующиее на колесную и гусеничную (а) и шагающую (б) машину

Как видно из схемы сил, для наземных колесных и гусеничных транспортных средств $F_{mscu} = F_{cuenn} - F_{conp.}$. Силы сцепления $F_{cuenn} = k_{\varphi} N$ и сопротивления движению $F_{conp.} = k_f N$ пропорциональны нормальной реакции грунта N. Для слабонесущих грунтов соотношение

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-08-01144.

коэффициентов сцепления k_{φ} и сопротивления движению k_f таково, что даже гусеничный движитель не позволяет реализовать значительных тяговых усилий. На слабых грунтах у гусеничных машин коэффициент сцепления лежит, как правило, в пределах $k_{\varphi} = 0,2-0,3$, а коэффициент $k_f = 0,1-0,2$ [1, 2 и др.]. У подводных аппаратов сила тяги уменьшается на силу сопротивления воды R_{godbi} . Так как колесные и гусеничные машины имеют плохо обтекаемые корпуса, то сила сопротивления воды соизмерима с $F_{conp.}$ даже при небольших скоростях движения. Придонное течение может привести к возрастанию силы R_{godbi} во много раз, так как она пропорциональна квадрату относительной скорости воды [2]. Так же нужен определенный запас тяги для преодоления уклонов. Таким образом, традиционные транспортные средства могут двигаться под водой лишь на пределе сцепления и для увеличения полезного тягового усилия необходимо увеличивать их массу (отрицательную плавучесть). По этой причине все подводные бульдозеры — это машины с массой в несколько десятков тонн.

Шагающий движитель может обеспечить на слабонесущих грунтах более высокие тягово-сцепные свойства, так как для шагающих машин сила тяги (рис. 1 б) равна силе сцепления $F_{mscu} = F_{cuenn}$ (если не учитывать сопротивления воды). Кроме того, аналог коэффициента сцепления для шагающих машин может быть >>1. Например, если нога «по колено» в грунте, то очевидно, можно реализовать значительную горизонтальную силу тяги.

В ВолгГТУ в условиях реальной местности проведен ряд исследований по изучению механизма взаимодействия опорных элементов (стоп) шагающих машин со слабыми и экологическими ранимыми грунтами [3, 4]. Исследования выполнялись на базе 5-ти тонного шагающего робототехнического комплекса «Восьминог». Часть испытаний проводилась в пруду-накопителе очистных сооружений Волжского азотно-кислородного завода. Большой условный клиренс (около 1,2 м) робота позволял ему работать на глубинах до 1,5 м. В докладе обсуждаются результаты проведенных исследований тягово-сцепных свойств и предельной грунтовой проходимости шагающих машин в подводных условиях.

Конструктивно «Восьминог» (рис. 2), выполнен в виде рамы, установленной на шагающих опорах правого и левого бортов. На раме расположены силовой привод, сменное технологическое оборудование и рабочее место оператора. Управление, при необходимости, может осуществляться по кабелю. Шагающие опоры выполнены в виде несущих балок и снабжены бортовым приводом. Привод опор правого и левого борта независимый, что позволяет машине осуществлять поворот бортовым способом. По концам опор установлены механизмы шагания (ноги). Использовались одностепенные 4-х звенные цикловые механизмы шагания «λ-образного» типа с пассивной адаптацией стопы к рельефу местности [5].



Рис. 2. Шагающий робототехнический комплекс «Восьминог»

Схема механизма шагания и траектория его опорной точки в относительном движении приведены на рис. 3. Точки на траектории расположены через равные промежутки

времени — через $\frac{1}{24}$ периода цикла. Точки с заливкой соответствуют опорной фазе. Механизмы шагания попарно сгруппированы в движители, их кривошипы установлены в противофазе на общей оси (рис. 4). Движители каждого борта кинематически связаны и работают синхронно. Это обеспечивает сохранение устойчивой походки и исключает необходимость управляемой системы адаптации. В итоге машина имеет минимальное число управляемых степеней свободы и становится существенно проще аналогов с движителями адаптивного типа.



Рис. 4. Шагающий движитель

Тягово-сцепные свойства определялись методом видеосъемки процесса движения при постепенно увеличивающейся крюковой нагрузке с последующей покадровой обработкой видеозаписи на ЭВМ. При проведении экспериментов шагающий робот двигался с малой скоростью в автономном режиме и буксировал с помощью троса грузовой автомобиль. Водитель автомобиля постепенно увеличивал тормозной момент, увеличивая, тем самым, нагрузку на крюке шагающей машины вплоть до полной ее остановки (при 100% буксовании стоп). Перпендикулярно движению располагалась видеокамера, направленная таким образом, что в поле ее видимости попадали корпус робота, шкала динамометра установленного на крюке и механизмы шагания одного борта. Это позволяло в течении нескольких шагов фиксировать перемещения корпуса, показания динамометра, а также угловое положение ведущих кривошипов. Перемещение корпуса фиксировалось по положению меток на несущих балках шагающих опор. Угол поворота кривошипов φ_1 (рис. 3 а) определялся либо непосредственно по их положению, либо по углу φ_3 коромысла механизма шагания, если кривошипы находились под водой. Угол φ_1 позволял определить положение стоп относительно корпуса.

При покадровой обработке видеозаписи, по перемещениям корпуса и стоп, определялись законы их движения. Необходимость определения закона движения корпуса обусловлена неравномерностью курсового движения шагающей машины, вызванной самим шагающим способом передвижения. Численно дифференцируя полученные зависимости, находились курсовые составляющие скорости корпуса машины и стоп. По их значениям вычислялся коэффициент буксования: $\delta = (v_T - v)/v_T$, где v и v_T — реальная и теоретическая (без буксовании стоп) курсовая скорость машины. Полученные характеристики привязывались к показаниям динамометра и углу поворота кривошипов. Это давало возможность построить зависимости силы сцепления и коэффициента k_{φ} от коэффициента буксования и угла φ_1 , а также определить максимальные значения коэффициента сцепления для исследуемого грунта.

При исследовании грунтовой проходимости находились условия, при которых наблюдалась полная потеря проходимости, обусловленная слабыми несущими свойствами грунта. Для этого осуществлялось движение в наиболее тяжелых, с точки зрения грунтовой проходимости, участках в заполненном илообразным осадком пруду-накопителе (рис. 5).



Рис. 5. Исследование предельной грунтовой проходимости

В процессе экспериментов применялись стопы с неразвитой опорной поверхностью «hoof-foot» и лыжеобразные стопы «ski-foot» (размером 240×1600 мм). Лыжеобразные стопы испытывались без грунтозацепов и с грунтозацепами (по одному на лыжу). Грунтозацепы, рабочей высотой 20 мм, располагались поперек стопы по всей ее ширине. Результаты полученные для одного грунтозацепа, позволяли оценить, путем пересчета [2], тягово-сцепные свойства движителя и для более развитой системы грунтозацепов. При использовании стоп «hoof-foot» давление на грунт составляло около 0,15 МПа, а стопы «ski-foot», в зависимости от загрузки машины, обеспечивали среднее давление в пределах 0,01–0,03 МПа.

Испытания показали, что на относительно хороших грунтах тягово-сцепные свойства шагающих машин хотя и превосходят тягово-сцепные свойства колесных машин, но мало отличаются от аналогичных свойств гусеничного движителя. Существенное превосходство шагающих машин по тяговым свойствам и проходимости проявлялось лишь при движении в особо сложных условиях, в частности, в условиях подводного грунта. Так на подводных грунтах коэффициент сцепления у шагающих машин изменялся, в зависимости от свойств грунта, от 0,2 до значений соизмеримых с грунтами с хорошими сцепными свойствами ($k_{\varphi} = 0.8-1.0$), а в ряде случаев значения k_{φ} были больше 1. Наилучшее сцепление, как правило, имело место при значительном погружении ноги в грунт. При этом существенного влияния грунтозацепов на тягово-сцепные свойства замечено не было.

Исследования грунтовой проходимости показали, что шагающие машины по этому показателю (при одинаковом давлении на грунт) существенно превосходят колесные и гусеничные машины. При испытаниях «Восьминог» (со стопами «ski-foot») уверенно преодолевал участки заполненные на $\frac{3}{4}$ илообразным осадком в пруду-накопителе на глубинах до 1,2–1,5 м. Проходимость ограничивалась только опасениями выхода из строя незащищенных тяговых электродвигателей при погружении машины в воду до их уровня. Движение традиционных транспортных средств в таких условиях практически невозможно. Эксперименты показали, что значения давления на грунт, рекомендованные для гусеничных

и колесных машин повышенной проходимости 0,015–0,02 МПа [1, 2], могут быть для шагающих машин увеличены, по крайней мере, до 0,03 МПа. Это объясняется механизмом взаимодействия стопы с грунтом, близким к статическому, и большим условным клиренсом машины, что исключает ее посадку днищем на грунт и потерю сцепного веса.

Надо отметить, что по результатам экспериментов не удалось получить зависимость $k_{\varphi}(\delta)$ в традиционном ее виде, так как имела место зависимость δ от угла поворота кривошипов механизмов шагания. При смене ног наблюдался некоторый «провал» тяговых свойств и имело место наибольшее буксование стоп [6]. Это объясняется некоторой кинематической несогласованностью относительных скоростей опорных точек работающих в противофазе механизмов шагания в момент смены стоп. Эффект наиболее заметен на деформируемых грунтах при использовании стоп «hoof-foot», так как в этом случае из-за большой глубины деформации грунта смена стоп растянута по времени.

Таким образом, в условиях подводного грунта шагающие движители, в сравнении с гусеничными и колесными, могут обеспечить более высокие тягово-сцепные свойства и повышенную проходимость. Это объясняется следующим. Для шагающих движителей грунт не является препятствием для передвижения, а лишь требует необходимых затрат мощности на его прессование, поэтому полезная сила тяги равна силе сцепления (за вычетом сопротивления воды). Аналог коэффициента сцепления для шагающих машин может быть существенно больше 1. В результате на грунтах с низкой несущей способностью можно реализовать по сцеплению силу тяги больше веса машины (у колесных и гусеничных машин максимально возможная по сцеплению сила тяги на слабых грунтах не превосходит 10–20% от их веса). По этой причине шагающие машины могут быть востребованы при внедрении новых промышленных технологий освоения ресурсов морского дна.

Литература

1. Тракторы: Теория / Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е. и др. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.

2. Забавников Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин. М., Машиностроение, 1975. 448 с.

3. Чернышев В.В. Полевые исследования шагающих машин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2004. №4. С. 20–22.

4. On ground and profile practicability of multi-legged walking machines / Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V and others //Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001: Proc. of the 4-th International Conference. Karlsruhe, Germany, 2001. P.1005–1012.

5. Пат. 2156711 РФ, В 62 D 57/032 Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / Д.Е. Охоцимский, Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, С.В. Шерстобитов. 2000.

6. О позиционной зависимости тягово-сцепных свойств шагающих машин с цикловыми движителями / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, Н.Е. Фролова // Тракторы и сельхозмашины. 2009, № 6. С. 21–25.