

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ПРИВЯЗНОЙ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО РОБОТА С ПОВЕРХНОСТНЫМ МОДУЛЕМ РАДИОСВЯЗИ

В.В. Костенко, А.Ю. Быканова, Д.Н. Михайлов, И.Г. Мокеева, А.Ю. Толстоногов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹

Рассматривается технология измерения навигационно-пилотажных и динамических характеристик специализированной привязной системы автономного подводного робота (АПР), основная идея которой заключается в применении буксируемого по поверхности поплавка-ретранслятора, оборудованного средствами спутниковой навигации и радиосвязи с судовым постом управления. Специфика проблемы состоит в измерении вектора натяжения кабеля связи в точках его крепления к АПР и поплавку-ретранслятору и построении интегрированной информационно-измерительной системы, способной эффективно функционировать в режиме реального времени. Принятые в работе технические решения обеспечивают измерение и регистрацию основных параметров движения АПР с учетом влияния кабеля связи. Аппаратно-программные средства измерительного комплекса позволяют интегрировать в общий файл данные о скорости движения и географических координатах поплавка-ретранслятора с параметрами движения АПР, местоположение которого определяется гидроакустической навигационной системой. Элементная база комплекса обеспечивает заданную точность определения измеряемых параметров в диапазоне их изменения. С помощью разработанного алгоритма определяются проекции вектора натяжения кабеля на оси связанной системы координат аппарата и поплавок по измеренным углам отклонения соответствующих измерительных модулей от вертикали. Измеряемые параметры транслируются на накопитель бортового компьютера АПР, где они регистрируются в виде файла синхронизированных по времени данных с возможностью дальнейшей графоаналитической обработки и использования при параметрической идентификации модели динамики кабеля связи.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время активно развиваются подводные привязные системы (ППС), которые за счет использования буксируемого поверхностного модуля радиосвязи (ПМР) обеспечивают информационный обмен АПР с постом управления в реальном масштабе времени, а также возможность уточнения географических координат аппарата по данным приемника спутниковой навигационной системы (СНС) поплавка [1–6]. Основные варианты организации ППС иллюстрирует рис. 1, где приняты следующие обозначения: БНПА – буксируемый необитаемый подводный аппарат, БМ – буксируемый в толще воды модуль.

Динамические и энергетические свойства подводного аппарата, функционирующего в составе привязной системы, в значительной степени определяются возмущениями от буксируемого оборудования.

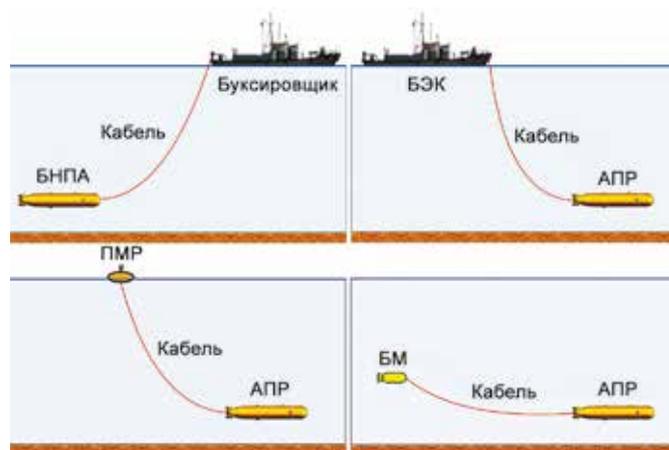


Рис. 1. Варианты подводных привязных систем

¹ 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.: +7 (423) 243-25-78.
E-mail: kostenko@marine.febras.ru



Рис. 2. Фрагменты испытаний АПР «ММТ-300» с буксируемым ПМР

На предварительном этапе проектирования параметры буксируемого поплавка, кабеля связи и движительно-рулевого комплекса аппарата определяются в результате моделирования его движения как в установившихся режимах [7–9], так и с учетом динамики кабеля связи [10–12]. Для параметрической идентификации модели динамики кабеля, уточнения ее структуры и отладки алгоритмов управления необходимы экспериментальные данные о параметрах движения ППС по типовым траекториям. Целью проведенных исследований являлась разработка программно-аппаратного комплекса для измерения и регистрации основных параметров движения ППС: натяжений на концах кабеля связи, координат ПМР и АПР, характеристик движения аппарата и параметров работы его движительно-рулевого комплекса. Достижение поставленной цели потребовало последовательного решения следующих задач:

- определение модели проведения эксперимента по измерению параметров ППС;
- разработка функциональной схемы комплекса;
- расчет проекций векторов натяжения кабеля связи;
- обоснование структуры программного обеспечения комплекса;
- разработка конструктивных и схемотехнических решений измерительного модуля.

■ Модель проведения эксперимента по измерению параметров движения ППС

В ИПМТ накоплен многолетний опыт разработки привязных систем, в которых АПР буксирует поверхностный поплавок [7, 8, 12] или магнитометр (модуль гидроакустических антенн) в толще воды [9–11].

Этот опыт последнее время активно используется на начальных стадиях натурных испытаний АПР разработки ИПМТ ДВО РАН в условиях мелководного полигона, что позволяет значительно сократить время отладки базовых систем аппарата, включая средства навигации и движения. На рис. 2 приведен фрагмент натурных испытаний АПР «ММТ-300» с использованием ПМР разработки ИПМТ. Выбор модели проведения эксперимента определялся техническими возможностями ее реализации в условиях мелководного полигона ограниченной глубины и площади акватории. При этом обеспечивающее судно (ОС) должно быть оснащено приемником СНС, средствами Wi-Fi связи с ПМР и предварительно откалиброванной гидроакустической навигационной системой с ультракороткой базой типа Evo Logics USBL S2C18/34. Для минимизации возмущений на АПР от буксировки поплавка запас длины кабеля связи должен в 2–3 раза превышать планируемую глубину хода аппарата [12]. Судно должно быть пришвартовано к пирсу или находиться на якорной стоянке для обеспечения стабиль-

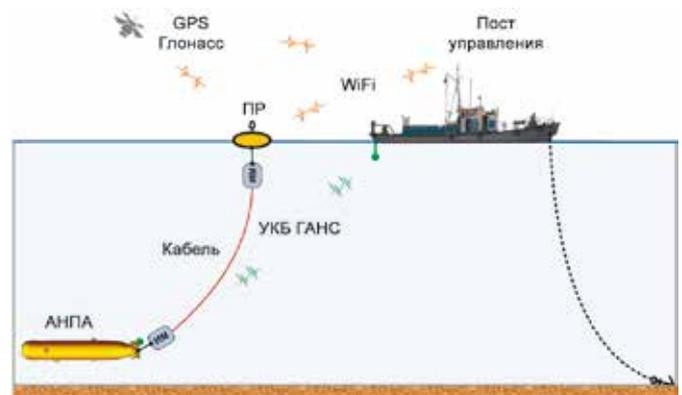


Рис. 3. Модель проведения эксперимента по определению параметров движения ППС

ности его географических координат, которые используются в качестве опорных при определении взаимных координат АПР и ПМР. К реализации была принята модель проведения экспериментов по исследованию параметров движения ППС, показанная на рис. 3.

■ Функциональная схема и характеристики комплекса

В соответствии с целевым назначением комплекса был определен следующий перечень измеряемых технических характеристик ППС:

- силы натяжения кабеля связи в точках крепления к ПМР и АПР, а также их пространственная ориентация относительно вертикали;
- географические координаты ПМР;
- координаты АПР под водой относительно судна обеспечения;
- глубина погружения АПР;
- угловая ориентация АПР по крену, курсу и дифференту;
- токи, потребляемые электроприводом движителей аппарата;

- команды управления движителями аппарата.

Кроме решения задач измерения перечисленных выше параметров комплекс должен обеспечить их передачу на накопитель данных АПР в реальном времени и синхронизированную во времени регистрацию в виде общего файла данных с возможностью дальнейшей графоаналитической обработки. В результате проведенного анализа требований по назначению и с учетом доступности элементной базы был определен состав оборудования комплекса, а также разработана его функциональная схема, приведенная на рис. 4. На схеме приняты следующие условные обозначения: x_a, z_a – координаты АПР относительно судовой антенны УКБ ГАНС; x_{oc}, z_{oc} – географические координаты судна по СНС; H – глубина погружения аппарата; θ, φ, ψ – углы крена, курса и дифферента АПР соответственно; V_x, V_z – продольная и поперечная скорости движения по доплеровскому лагу; $I_{дрк}$ – токи, потребляемые электроприводом движителей; $N_{дрк}$ – коды управления движителями; T_a, ψ_a, θ_a – сила натяжения кабеля в точке крепления к аппарату и ее угловые отклонения от вертикали по крену и дифференту соответственно; $T_{п}, \psi_{п}, \theta_{п}$ – сила натяжения кабеля в точке крепления к ПМР и ее угловые

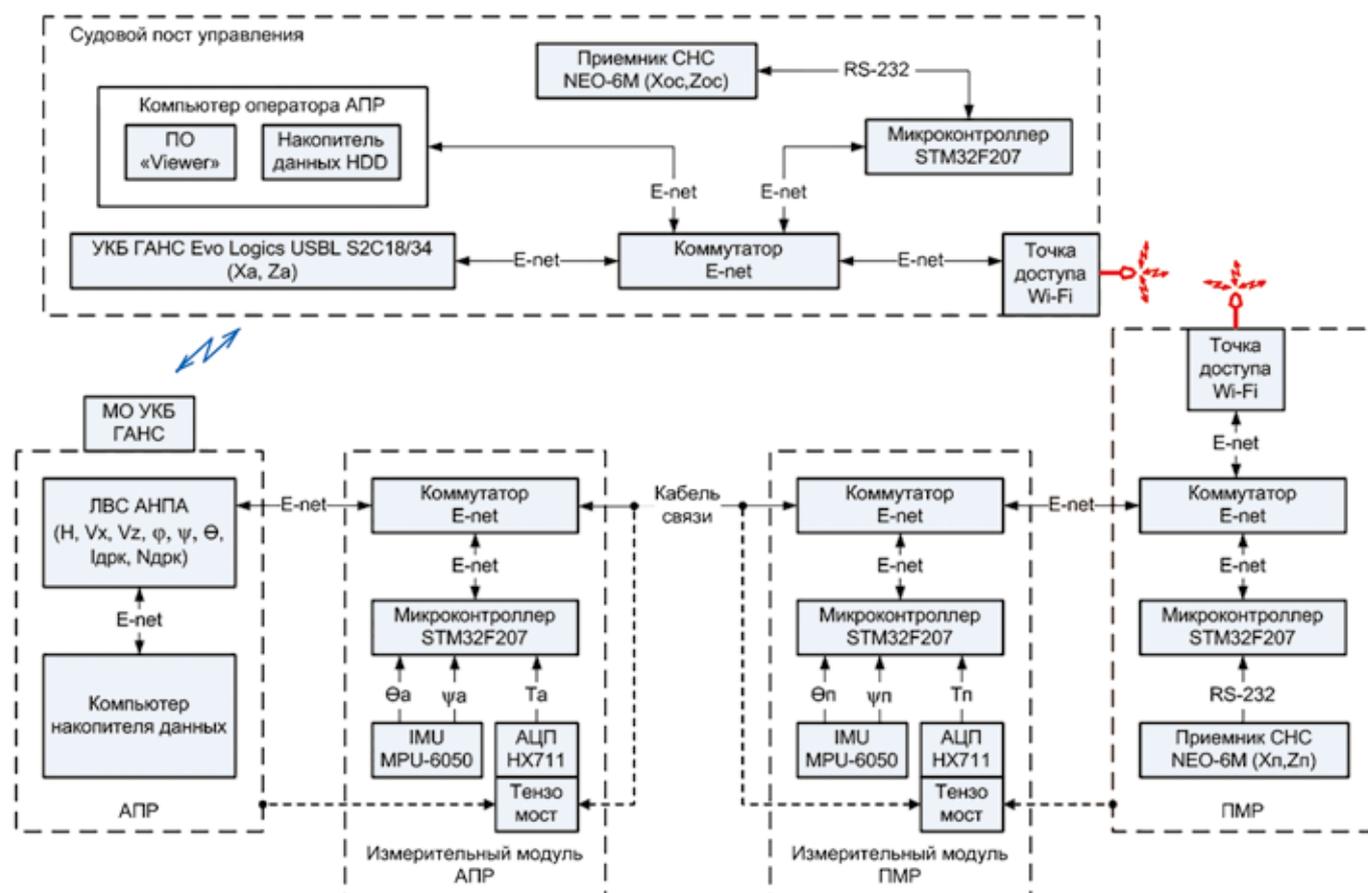


Рис. 4. Функциональная схема комплекса измерения параметров движения ППС

отклонения от вертикали по крену и дифференту соответственно; $x_{П}$, $z_{П}$ – географические координаты ПМР по СНС.

В приведенную ниже таблицу сведены основные характеристики измеряемых параметров движения ППС, соответствующие выбранной элементной базе.

Основные характеристики измеряемых параметров ППС

Источник информации	Параметр	Диапазон	Точность
Судовой приемник СНС	Координаты ПМР, м	–	$\pm 5,0$
Приемник СНС ПМР	Координаты ПМР, м	–	$\pm 5,0$
Измерительный модуль ПМР	Натяжение кабеля, кг	0÷50	$\pm 0,01$
	Угол крена ИМ, град.	± 90	$\pm 0,5$
	Угол дифферента ИМ, град.	± 90	$\pm 0,5$
АПР	Счисленные координаты, м	–	$\pm 0,9$
	Угол крена, град.	± 90	$\pm 0,5$
	Угол курса, град.	0÷360	± 2
	Угол дифферента, град.	± 90	$\pm 0,5$
	Глубина погружения, м	0÷300	$\pm 0,1$
	Скорость V_x по ДЛ, м/с	± 2	$\pm 0,02$
	Скорость V_z по ДЛ, м/с	± 2	$\pm 0,02$
	Ток потребления двигателей, А	0÷20	$\pm 0,05$
	Код управления двигателями	± 127	–
Измерительный модуль АПР	Натяжение кабеля, кг	0÷50	$\pm 0,01$
	Крен ИМ, град.	± 90	$\pm 0,5$
	Дифферент ИМ, град.	± 90	$\pm 0,5$
УКБ ГАНС	Наклонная дальность, м	1÷600	$\pm 0,01$
	Угол пеленга, град.	0÷360	0,1

■ Структура программного обеспечения измерительного комплекса

Основной задачей программного обеспечения измерительного комплекса является сбор и накопление информации о силе натяжения и ее ориентации в пространстве от измерительных модулей АПР и ПМР для последующей обработки с учетом взаимного положения аппарата и поплавка-ретранслятора. Дополнительно из локальной вычислительной сети АПР в общий информационный файл добавляются параметры движения аппарата и данные о работе его

двигательно-рулевого комплекса. В соответствии с этим в программное обеспечение комплекса вошли программы-обработчики информации (драйверы) измерительного модуля АПР, измерительного модуля ПМР, приемника СНС ПМР, судового приемника СНС и ГАНС УКБ, а также навигационная программа и программа логирования данных, которые являются частью системы программного управления аппарата.

Важным требованием достоверной интерпретации данных от всех устройств комплекса является их точная временная синхронизация. Для ее реализации драйверы обоих ИМ, а также драйвер приемника СНС поплавка-ретранслятора были установлены на компьютере автопилота АПР, где предварительно запущена программа навигации АПР и программа логирования данных. При этом использование интерфейса Ethernet в качестве стандарта обмена данными с измерительными модулями обеспечивает естественную синхронизацию всей полученной информации, необходимой для последующего анализа, по часам компьютера автопилота АПР.

Для интеграции приемников СНС ПМР и обеспечивающего судна в локальную сеть комплекса был использован преобразователь интерфейса RS-232<–>Ethernet. Наличие в составе комплекса ПМР позволяет передавать текущие координаты судна и координаты АПР, полученные на обеспечивающем судне от УКБ комплекса, в навигационную программу аппарата через Wi-Fi-радиоканал и далее буксировочный кабель связи. На рис. 5 показана предлагаемая архитектура программного обеспечения комплекса измерения параметров движения привязной системы.

■ Расчет проекций сил натяжения кабеля связи

Компенсация возмущений от буксировки управляющими воздействиями двигательно-рулевого комплекса АПР, а также параметрическая идентификация динамической модели кабеля по экспериментальным данным о маневрировании ППС требует определения проекций сил натяжения на аппарате T_{xa} , T_{ya} , T_{za} и поплавке T_{xn} , T_{yn} , T_{zn} на оси измерительных систем координат $O_a x_a y_a z_a$ и $O_n x_n y_n z_n$ соответственно. В расчете проекций сил натяжения концов кабеля связи используются системы координат, показанные на рис. 6:

- $O\zeta\eta$ – неподвижная в пространстве система координат, начало ее находится в произвольной точке поверхности моря, соответствующей географическим координатам ОС, плоскость $O\zeta\zeta$ горизонтальная

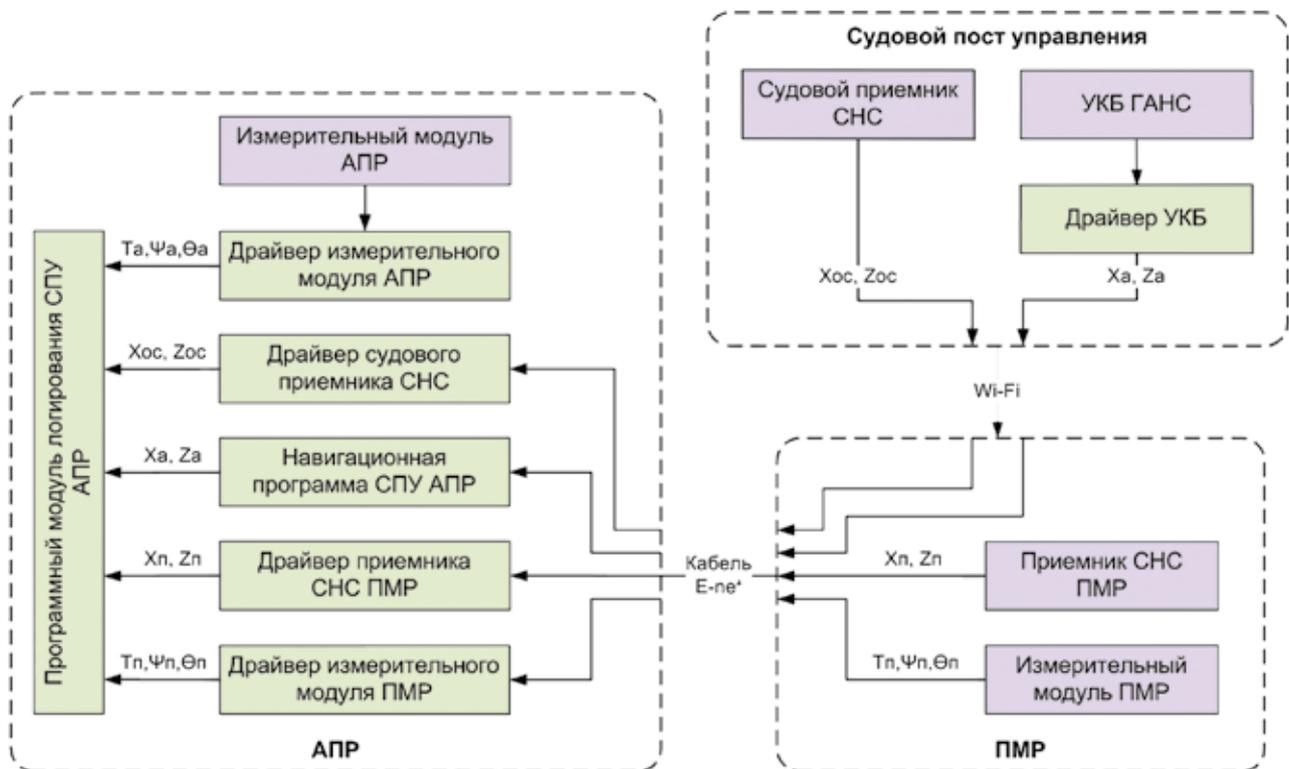


Рис. 5. Структура программного обеспечения измерительного комплекса

(плоскость горизонта), ось $O\eta$ направлена вертикально вверх, ось $O\zeta$ направлена на север;

- $O_a x_a y_a z_a$ – подвижная в пространстве система координат, связанная с АПР, начало ее находится в точке крепления измерительного модуля к аппарату и приложения силы натяжения кабеля связи, плоскость $O_a x_a z_a$ горизонтальная (плоскость горизонта), ось

$O_a y_a$ направлена вертикально вверх, ось $O_a x_a$ направлена по курсу движения аппарата (совпадает с проекцией продольной оси АПР на плоскость горизонта);

- $O_n x_n y_n z_n$ – подвижная в пространстве система координат, связанная с ПМР, начало ее находится в точке крепления измерительного модуля к поплавку и приложения силы натяжения кабеля связи, пло-

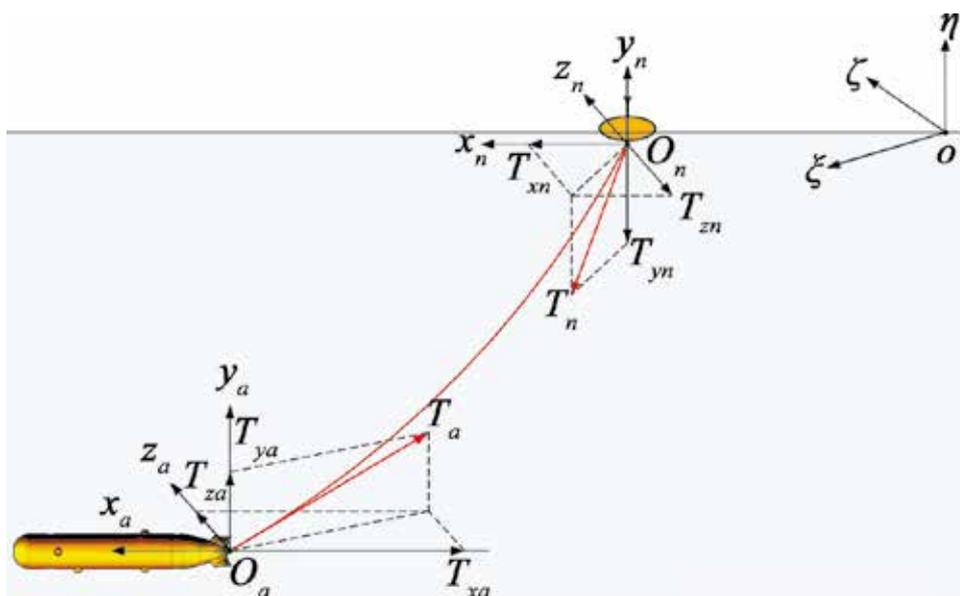


Рис. 6. Системы координат и проекции сил натяжения кабеля связи: $T_a, T_{xa}, T_{ya}, T_{za}$ – результирующая и проекции натяжения кабеля на АПР, $T_n, T_{xn}, T_{yn}, T_{zn}$ – результирующая и проекции натяжения кабеля на ПМР

скость $O_n x_n z_n$ горизонтальная (плоскость горизонта), ось $O_n y_n$ направлена вертикально вверх, ось $O_n x_n$ направлена по курсу движения поплавка (совпадает с проекцией продольной оси ПМР на плоскость горизонта).

Оборудование измерительных модулей (ИМ) комплекса позволяет определять не только результирующие силы натяжения кабеля, но и угловые отклонения этих сил от вертикали по крену и дифференту через измерение аналогичных углов поворота ИМ. Следует отметить, что узел крепления модулей к АПР/ПМР представляет собой карданов подвес, который обеспечивает поворот ИМ для аппарата вокруг осей $O_a x_a$ и $O_a z_a$, а для поплавка – вокруг осей $O_n x_n$ и $O_n z_n$ с центром в точке крепления. При этом оси $O_a x_a$ и $O_n x_n$ направлены по курсу движения аппарата и поплавка соответственно.

Определим зависимость проекций силы натяжения кабеля в точке крепления к аппарату T_{xa} , T_{ya} , T_{za} от углов отклонения его измерительного модуля от вертикали по крену θ и дифференту ψ . Варианты проекций силы натяжения кабеля на аппарате приведены на рис. 7, где приняты следующие обозначения: α_{xz} , α_{xy} , α_{yz} – углы наклона вектора силы натяжения T_a к координатным плоскостям $O_a x_a z_a$, $O_a x_a y_a$, и $O_a x_a y_a$ соответственно; β_x , β_y , β_z – углы между проекциями вектора натяжения T_{xa} , T_{ya} , T_{za} и осями $O_a x_a$, $O_a y_a$ и $O_a z_a$ соответственно; $\theta = \beta_y$ – измеряемое угловое отклонение вектора натяжения по крену, $\psi = 90^\circ - \beta_x$ – измеряемое угловое отклонение вектора силы натяжения по дифференту.

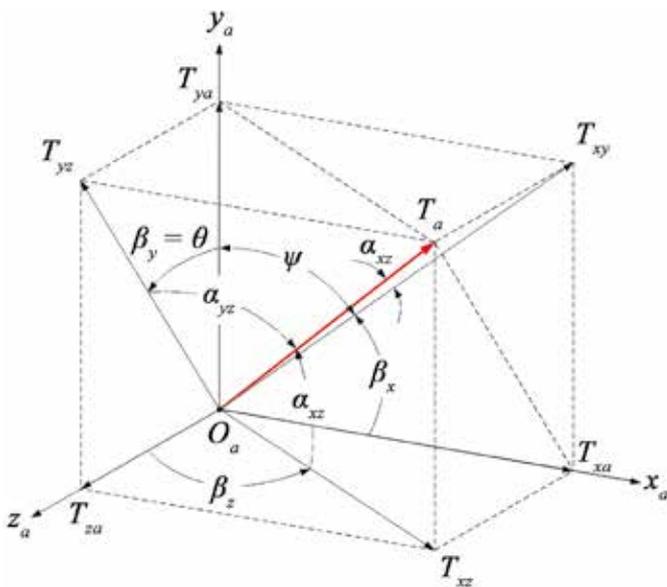


Рис. 7. Проекция вектора силы натяжения кабеля связи на плоскости системы координат измерительного модуля АПР

Искомые проекции можно выразить через проекции T_{xa} , T_{ya} , T_{za} и вспомогательные углы в соответствии со следующими выражениями:

$$\begin{cases} T_{xz} = T_a \cos \alpha_{xz}, \\ T_{xa} = T_a \cos \alpha_{xz} \sin \beta_z, \\ T_{ya} = T_a \sin \alpha_{xz}, \\ T_{za} = T_a \cos \alpha_{xz} \cos \beta_z. \end{cases} \quad (1) \quad \begin{cases} T_{xy} = T_a \cos \alpha_{xy}, \\ T_{xa} = T_a \cos \alpha_{xy} \sin \psi, \\ T_{ya} = T_a \cos \alpha_{xy} \cos \psi, \\ T_{za} = T_a \sin \alpha_{xy}. \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} T_{yz} = T_a \cos \alpha_{yz}, \\ T_{xa} = T_a \sin \alpha_{yz}, \\ T_{ya} = T_a \cos \alpha_{yz} \cos \theta, \\ T_{za} = T_a \cos \alpha_{yz} \sin \theta. \end{cases} \quad (3)$$

Из приведенных выше соотношений следует, что для расчета проекций T_{xa} , T_{ya} , T_{za} вектора силы натяжения T_a необходимо предварительно определить связь вспомогательных углов α_{xz} , α_{xy} , α_{yz} с измеряемыми углами крена и дифферента измерительного модуля.

Приравняв T_{ya} в (2) и (3), получим:

$$\cos \alpha_{xy} = \frac{\cos \alpha_{yz} \cos \theta}{\cos \psi}. \quad (4)$$

Из равенства T_{za} в соотношениях (2) и (3) следует:

$$\cos \alpha_{yz} = \frac{\sin \alpha_{xy}}{\sin \theta}. \quad (5)$$

В результате подстановки (5) в (4) определяется вспомогательный угол α_{xy} :

$$\alpha_{xy} = \arctg(\tg \theta \cos \psi).$$

Далее, используя соотношения (2) и (3) для проекции T_{xa} получим с учетом выражения (5):

$$\alpha_{yz} = \arctg(\tg \psi \cos \theta).$$

Приравняв выражения для T_{ya} из (1) и (2), находим вспомогательный угол α_{xz} :

$$\alpha_{xz} = \arcsin(\cos \alpha_{xy} \cos \psi).$$

Для известных значений вспомогательных углов α_{xy} , α_{yz} , α_{xz} искомые проекции силы натяжения кабеля можно определить по следующим формулам:

$$T_{xa} = T_a \sin \alpha_{yz}, \quad T_{ya} = T_a \sin \alpha_{xz}, \quad T_{za} = T_a \sin \alpha_{xy}.$$

■ Конструктивные решения измерительного модуля

Конструктивный облик измерительного модуля определяется требованиями назначения, а также со-

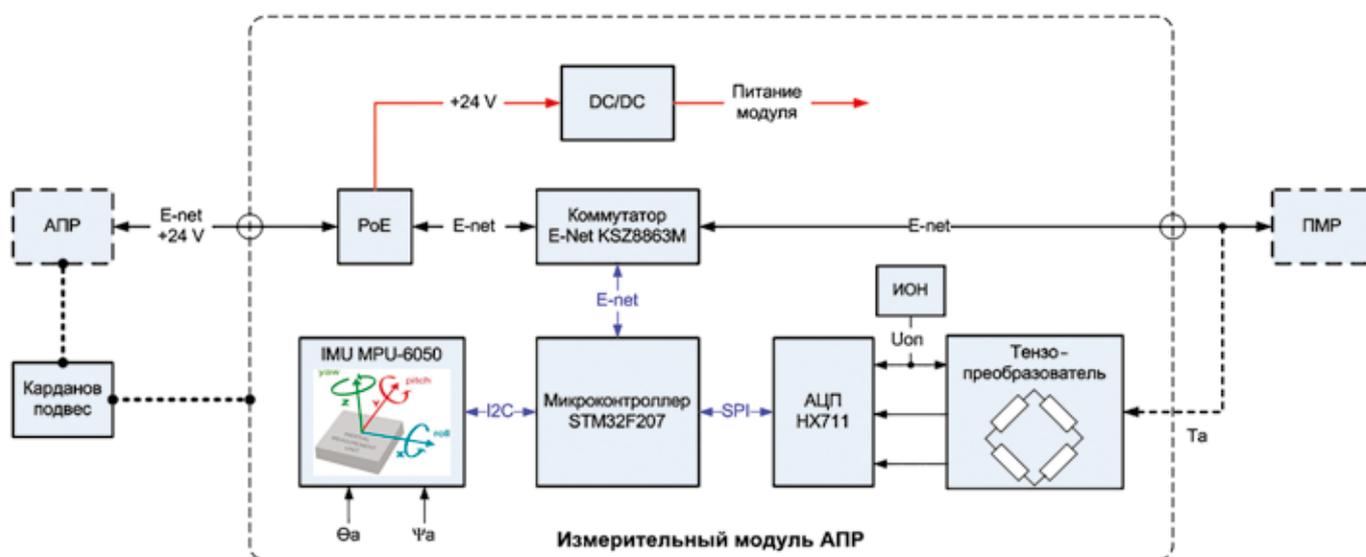


Рис. 8. Функциональная схема измерительного модуля АПР

ставом и связями оборудования, которые иллюстрирует функциональная схема устройства (рис. 8).

Схемотехника модуля обеспечивает его электрическое питание через стандартную витую пару кабеля связи с АПР/ПМР по технологии «Power over Ethernet» (PoE) и информационный обмен по интерфейсу Ethernet. При этом встроенное оборудование включается в разрыв кабеля связи. Основной конструкции модуля является герметичный контейнер 6 (рис. 9), в котором реализованы сальниковые гермовводы кабелей связи с АПР и ПМР. При этом натяжение кабеля передается на подвижный шток тензорезистивного преобразователя через карабин. Герметичный контейнер ИМ крепится на аппарате к точке буксировки через карданов подвес 3, который обеспечивает угловую ориентацию модуля в соответствии с направлением вектора силы натяжения кабеля (см. рис. 7). Конструктивный облик измерительного модуля с интеграцией средств измерения параметров натяжения кабеля, а также устройств информацион-

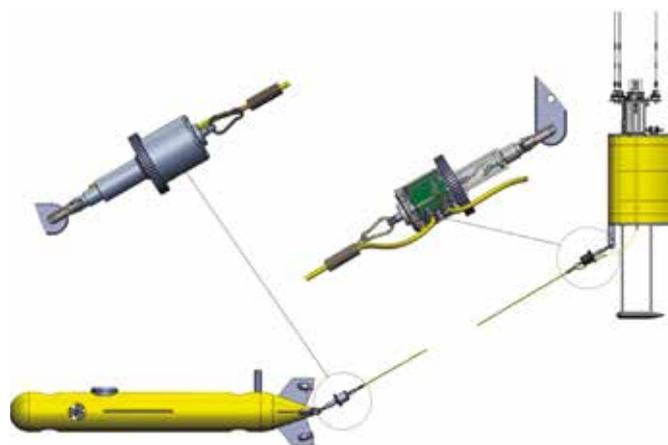


Рис. 10. Размещение измерительных модулей в составе ППС

ного обмена показан на рис. 9, рис. 10 иллюстрирует размещение измерительных модулей в составе подводной привязной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ проведенных исследований позволяет сделать следующие выводы:

- определен перечень параметров движения ППС и состав комплекса с выбором конкретной элементной базы, обеспечивающей измерение с точностью, необходимой для дальнейшей параметрической идентификации динамической модели системы по результатам натурного эксперимента;
- проработаны вопросы объединения в единую вычислительную сеть АПР, ПМР, двух измерительных модулей, судового приемника СНС и оборудования УКБ ГАНС;

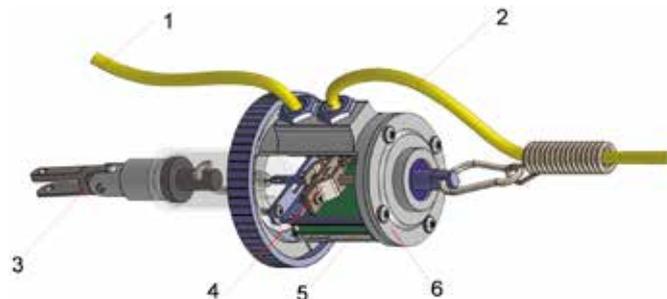


Рис. 9. Конструктивный облик измерительного модуля АПР: 1 – кабель связи с АПР; 2 – кабель связи с ПМР; 3 – карданов подвес крепления модуля к аппарату; 4 – тензорезистивный преобразователь натяжения кабеля связи с ПМР; 5 – электронные платы; 6 – герметичный контейнер модуля

- использование интерфейса Ethernet в качестве стандарта обмена данными с измерительными модулями, АПР, ПМР и судовым оборудованием обеспечивает естественную синхронизацию всей полученной информации, необходимой для последующего анализа, по часам компьютера автопилота аппарата;
- разработана герметичная конструкция измерительного модуля, позволяющего определять модуль вектора натяжения кабеля связи и его отклонения от

вертикали, что позволяет вычислять проекции упомянутого вектора на оси связанной системы координат АПР и ПМР;

- регистрация кодов управления и токов потребления двигателей АПР в совокупности с измеренными возмущениями от буксировки ПМР позволит оценить влияние скорости движения аппарата на тяговые характеристики его маршевых и подруливающих двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 8813669 US, H01Q1/04. Towed antenna system and method / Race R. E., Piskura J. C., Sanford D.S. – № 20110162573; Заявл. 09.06.2010, опубл. 26.08.2014.
2. Kraige D. Retractable UUV Antenna Buoy with Smart Tether GPS // KCF Technologies, US Naval Sea Systems Command SBIR. 2011. No. 4. P. T020.
3. Nishida Y. et al. Development of an autonomous buoy system for AUV // OCEANS 2015-Genova. IEEE, 2015. P. 1–6.
4. Pat. 8104420 USA, B63B21/66. Tethered tow body, communications apparatus and system / Wiggins J. et al. – No. US20120118213A1. 2012.
5. Pat. 9223002 USA, G01S5/0045. System and method for determining the position of an underwater vehicle / Crowell J.C. – No. US20090216444A1. 2015.
6. Kostenko V.V., Tolstonogov A.Y. The Robotic Complex for Remote Aqua Monitoring // 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). Kobe, 2018. P. 1–9.
7. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф.; Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / ФГБУН Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН. Владивосток, 2018. 368 с.
8. Костенко В.В., Львов О.Ю. Комбинированная система связи и навигации автономного подводного робота с поплавковым модулем // Подводные исследования и робототехника. 2017. № 1 (23). С. 31–43.
9. Костенко В.В., Мокеева И.Г., Ваулин Ю.В., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И. Особенности координирования донных источников навигационных сигналов с использованием буксируемого антенного модуля // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 2 (26). С. 4–11.
10. Костенко В.В., Мокеева И.Г., Толстоногов А.Ю. Управление движением АНПА при буксировке магнитометра // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 1 (195). С. 78–89.
11. Kostenko V.V., Tolstonogov A.Y., Mokeeva I.G. The Combined AUV Motion Control with Towed Magnetometer // 2019 IEEE Underwater Technology (UT). Kaohsiung, Taiwan, 2019. P. 1–7.
12. Костенко В.В., Мокеева И.Г. Исследование характеристик установившихся режимов и динамики привязной системы автономного подводного робота с буксируемым поверхностным модулем радиосвязи // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 2 (32). С. 34–41.

