

УДК 551.46.07

РЕГУЛИРОВАНИЕ ПЛАВУЧЕСТИ И ДИФФЕРЕНТА АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО РОБОТА

В.А. Гой, В.В. Костенко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹

При создании автономного подводного робота, предназначенного для высокоточных измерений характеристик физических полей, решается задача построения системы динамического позиционирования с минимумом шумовых помех. В частности, это относится к синтезу системы регулирования плавучести и дифферента, обеспечивающей высокое качество управления (позиционирования) по глубине погружения при отсутствии шумов, влияющих на работу измерительных систем. При разработке такой системы был использован метод перекачивания рабочей жидкости из гидравлических контейнеров в емкости изменяемого объема. Целью исследований в данной работе является разработка конструктивного облика и алгоритмов управления системы, обеспечивающей экономное и бесшумное регулирование плавучести и угла дифферента подводного аппарата малого водоизмещения. При этом были определены требования к управляющим воздействиям на основе возможного разброса плотности воды и заданных диапазонов регулирования угла дифферента и скорости вертикального движения. Разработанная математическая модель системы учитывает экспериментальные характеристики привода и влияние глубины погружения на производительность насосов. Определены оптимальные характеристики электродвигателя и гидравлического насоса, соответствующих заданным значениям динамических параметров. Алгоритмы управления системой оперируют оценками перекачиваемых объемов рабочей жидкости в зависимости от числа оборотов насоса. Принятое конструкторское решение позволяет представить облик системы, интегрированной в структуру автономного подводного аппарата. Экспериментальный образец системы успешно прошел бассейновые и натурные испытания в составе АНПА, созданного в ИПМТ ДВО РАН в последние годы. В процессе этих испытаний выполнены калибровочные измерения системы в бассейне и подтверждена возможность бесшумной стабилизации глубины погружения подводного аппарата в натуральных условиях.

ВВЕДЕНИЕ

Отклонение остаточной плавучести морских подводных объектов от расчетного значения в натуральных условиях обусловлено деформацией (обжатием) корпуса и изменением плотности воды, зависящей от глубины погружения, температуры и солености [1]. В отличие от вертикальных подруливающих движителей система регулирования плавучести и дифферента (СРПД) потребляет энергию и создает шум только в ходе кратковременной перекачки рабочей жидкости между прочным корпусом и внешними расширительными емкостями. Дополнительные требования к минимизации шумов, создаваемых

носителем высокочувствительных комбинированных приемников [2], предопределили необходимость в разработке малогабаритной СРПД АНПА.

Наиболее популярные в настоящее время варианты СРПД, нашедшие практическое применение, показаны на рис. 1 [3, 4, 5].

Вариант реализации СРПД «насос–масло» более других удовлетворяет основным требованиям к эксплуатационной надежности при использовании на борту малогабаритного АНПА:

- исполнительные механизмы и элементы конструкции защищены от агрессивного воздействия морской воды;
- конструктивное исполнение имеет минимальные вес и габариты;

- технические решения основаны на доступной элементной базе.

Целью настоящей статьи является разработка конструктивного облика и алгоритмов управления СРПД, обеспечивающей экономное и бесшумное регулирование плавучести и угла дифферента подводного аппарата малого водоизмещения. Достижение поставленной цели требует последовательного решения следующих задач:

- определение требований к управляющим воздействиям СРПД;

¹ 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел/факс: (4232) 432416. E-mail: kostenko@marine.febras.ru.

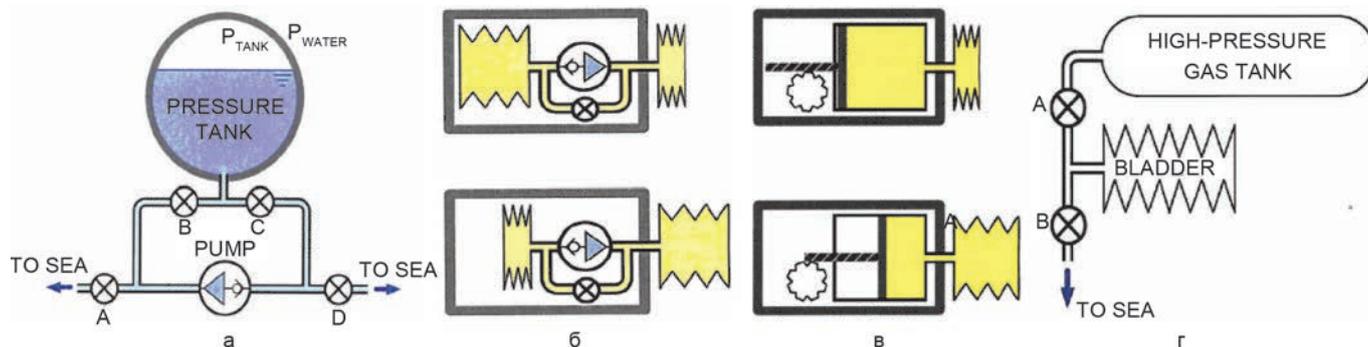


Рис. 1. Варианты реализации изменения объемов системы регулирования плавучести: а – насос–заборная вода, б – насос–масло, в – поршень–масло, г – газ–заборная вода

- выбор компоновочной схемы;
- разработка математической модели и алгоритмов управления СРПД;
- расчет параметров насосной станции;
- моделирование типовых режимов работы СРПД;
- разработка и испытание макетного образца СРПД.

■ Требования к управляющим воздействиям

Выбор компоновочной схемы и значений максимальной емкости изменяемого объема СРПД определяется требованиями к диапазону регулирования остаточной плавучести Q_r и моменту, действующему на носитель по дифференту M_Q . Емкости изменяемого объема должны обеспечивать компенсацию изменения плотности морской воды в заданном диапазоне $\rho_{\min} < \rho_{sw} < \rho_{\max}$ и «бесшумное» заглубление/всплытие с требуемой скоростью. При этом

$$Q_r = Q_\rho + Q_v, \quad (1)$$

$$Q_\rho = (\rho_{\max} - \rho_{\min}) \cdot g \cdot U_a,$$

$$Q_v = C_y(\alpha) \cdot \frac{\rho_{\max} \cdot V_{yz}^2}{2} \cdot U_a^{2/3},$$

где: Q_ρ – максимальное изменение плавучести аппарата при вариациях плотности воды в диапазоне $\rho_{\min} < \rho_{sw} < \rho_{\max}$; g – ускорение

свободного падения; U_a – водоизмещающий объем аппарата; Q_v – дополнительная плавучесть, необходимая для вертикального «бесшумного» движения аппарата с заданной скоростью V_{yz} ; $C_y(\alpha)$ – коэффициент гидродинамического сопротивления корпуса аппарата вертикальному движению с углом атаки $\alpha=90^\circ$.

Угол дифферента определяется балансом момента остойчивости M_{zo} и момента M_Q , действующего на аппарат со стороны СРПД (рис. 2).

При этом

$$M_{zo} = \rho_{\max} \cdot g \cdot h_o \cdot U_a \cdot \sin\psi,$$

$$M_Q = \rho_{\max} \cdot g \cdot U_\psi \cdot l_\psi \cdot \cos\psi, \quad (2)$$

$$U_\psi = \frac{h_o \cdot U_a}{l_\psi} \cdot \operatorname{tg}\psi,$$

где: h_o – метацентрическая высота; l_ψ – плечо момента M_Q ; U_ψ – объем дифферентующей емкости СРПД. В табл. 1 сведены результаты расчета требований к управляющим воздействиям СРПД малогабаритного АНПА ($U_a = 0,1 \text{ м}^3$) при следующих исходных данных: $\rho_{\min} = 998 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\max} = 1050 \text{ кг/м}^3$, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, $C_y(\alpha) = 1,2$, $l_\psi = 0,65 \text{ м}$, $h_o = 0,01 \text{ м}$, $\Psi = 45^\circ$, $V_{yz} = 0,3 \text{ м/с}$.

■ Компоновочная схема

Регулирование плавучести аппарата и его статического дифферента обеспечивается компоновочной схемой с двумя емкостями

изменяемого объема. Режимы работы принятой схемы СРПД поясняет рис. 3.

В соответствии с приведенной компоновочной схемой суммарная остаточная плавучесть аппарата с учетом СРПД будет

$$Q_\Sigma = Q_a + Q_r = (\rho_{sw} \cdot g \cdot U_a - g \cdot m_a) + \rho_{sw} \cdot g \cdot (U_k + U_n), \quad (3)$$

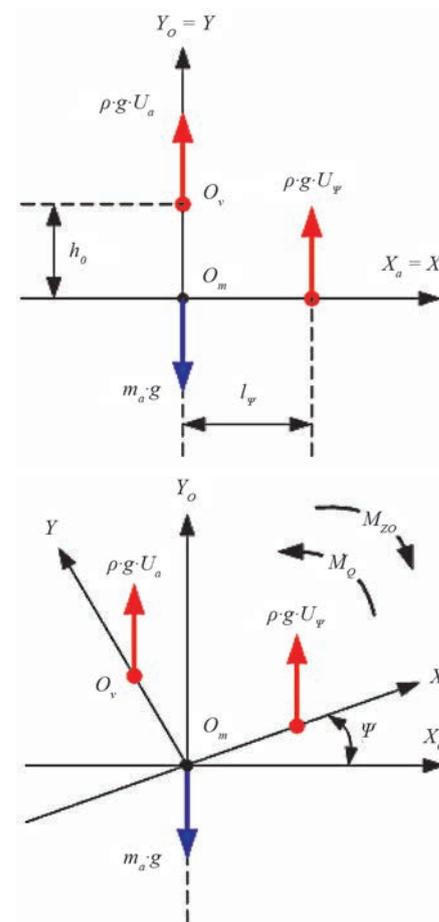


Рис. 2. Силы и моменты, определяющие угол дифферента аппарата

Таблица 1. Результаты расчета требований к управляющим воздействиям СРПД ($\psi = \pm 45^\circ$, $l_{\psi} = \pm 0,3$ м/с)

Управляющее воздействие	Значение
$Q_p = (\rho_{\max} - \rho_{\min}) \cdot g \cdot U_a$, Н	51,0
$Q_v = C_y(\alpha) \cdot \frac{\rho_{\max} \cdot V^2}{2} \cdot U_a^{2/3}$, Н	12,2
$Q_r = Q_p + Q_v$, Н	63,2
$U_{\psi} = \frac{h_o \cdot U_a}{l_{\psi}} \cdot \text{tg} \psi$, м ³	0,0015

где: Q_a – остаточная плавучесть аппарата; Q_r – дополнительная плавучесть, создаваемая изменяющимися объемами СРПД; U_k , U_n – изменяемые объемы кормовой и носовой секций СРПД соответственно; m_a – масса аппарата в кг.

Для симметричного регулирования плавучести аппарата синхронным изменением объемов U_n и U_k в диапазоне от нуля до максимума U_{\max} необходимо обеспечить условие

$$Q_a = \rho_{sw} \cdot g \cdot U_a - g \cdot m_a = -\rho_{sw} \cdot g \cdot U_{\max}, \quad (4)$$

где: U_{\max} – максимальное значение регулируемого объема каждой мембраны СРПД. Значения суммарной плавучести определяются соотношением, полученным в результате подстановки условия (4) в уравнение (3)

$$Q_{\Sigma} = Q_a + Q_r = -\rho_{sw} \cdot g \cdot U_{\max} + \rho_{sw} \cdot g \cdot (U_k + U_n),$$

$$Q_{\Sigma \max} = \rho_{sw} \cdot g \cdot U_{\max}, \text{ при } U_k = U_n = U_{\max}; \quad (5)$$

$$Q_{\Sigma \min} = -\rho_{sw} \cdot g \cdot U_{\max}, \text{ при } U_k = U_n = 0.$$

При этом дифференцирующий момент, создаваемый системой регулируемой плавучести,

$$M_Q = l_{\psi} \cdot \rho_{sw} \cdot g \cdot (U_n - U_k) \cdot \cos \psi \quad (6)$$

будет нулевым для любых значений синхронно изменяемых объемов $U_k = U_n$.

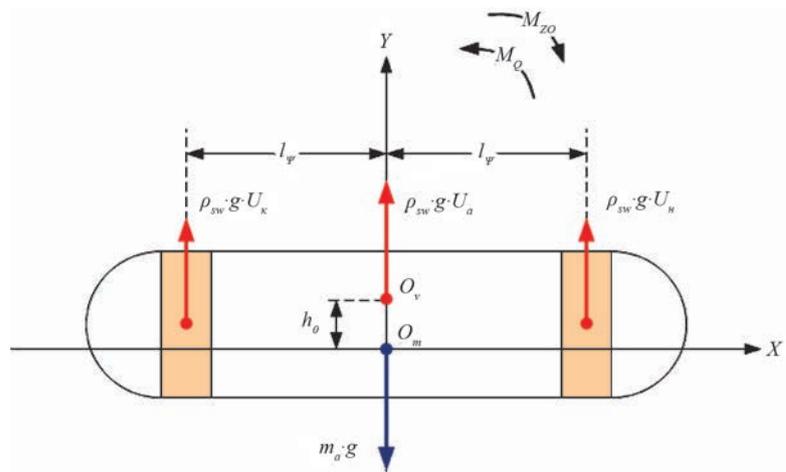


Рис. 3. Компоночная схема СРПД с двумя емкостями изменяемого объема

■ Математическая модель и алгоритмы управления СРПД

Функциональная схема СРПД, составленная с учетом формирования управляющих воздействий на аппарат в соответствии с уравнениями (3)–(6), и конструктивный облик СРПД представлены на рис. 4, 5. Каждая секция СРПД состоит из блока гидравлики, включающего в себя регулируемый электропривод с гидравлическим насосом, и эластичной мембраны изменяемого объема.

С учетом допущения о постоянстве объемного КПД насоса регулирование объемов мембран U_n и U_k системы можно контролиро-

вать через измеренное число оборотов приводного электродвигателя по соотношению:

$$U_i = \eta_v \cdot w_n \cdot N_i, \quad (7)$$

где: η_v – объемный КПД насоса; w_n – объем насоса в дм³/об; N_i – число оборотов насоса.

Для принятой компоновочной схемы системы и с учетом (5)–(6) требуемые объемы секций, реализующие заданные значения плавучести Q_{Σ} и момента $M_{Q\Sigma}$, соответствуют уравнению

$$Q_{zn} = 0,5 \cdot (Q_{\Sigma} - Q_a) + 0,5 \cdot \frac{M_{Q\Sigma}}{l_{\psi} \cdot \cos \psi}$$

$$Q_{zk} = 0,5 \cdot (Q_{\Sigma} - Q_a) - 0,5 \cdot \frac{M_{Q\Sigma}}{l_{\psi} \cdot \cos \psi} \quad (8)$$

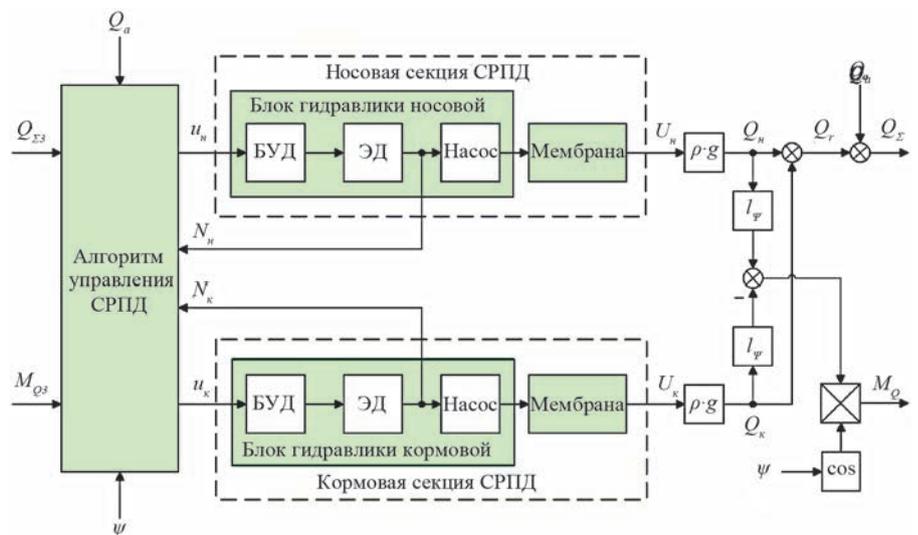


Рис. 4. Функциональная схема СРПД

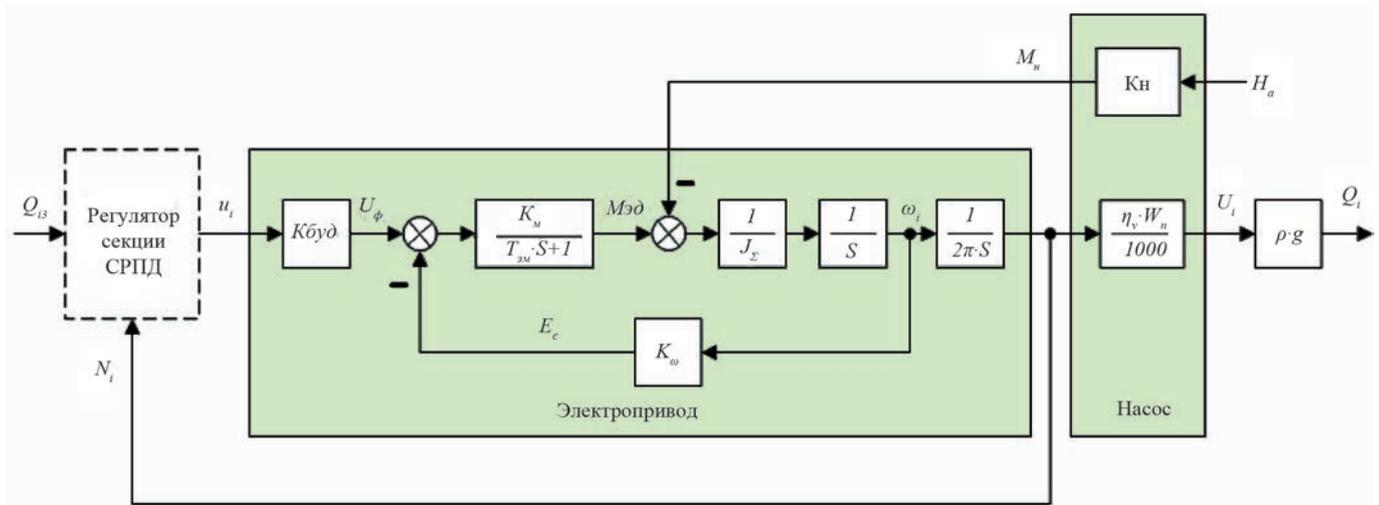


Рис. 7. Модель блока гидравлики СРПД

щая не только динамику электропривода, но и влияние глубины погружения на требуемый от привода момент. Структура модели, соответствующая уравнениям (11), показана на рис.7.

$$\begin{aligned} T_{эм} \cdot \dot{M}_{эд} + M_{эд} &= K_m (u_i \cdot K_{бУд} - \omega_i \cdot K_{\omega}), \\ M_n &= M_o + K_n \cdot H_a, \\ J_{\Sigma} \cdot \dot{\omega}_i &= M_{эд} - M_n, \\ \dot{N}_i &= \frac{\omega_i}{2 \cdot \pi}, \end{aligned}$$

$$Q_i = \eta_v \cdot w_n \cdot N_i \cdot \rho \cdot g / 1000,$$

где: $T_{эм}$ – электромагнитная постоянная электропривода, обусловленная индуктивностью статора; $M_{эд}$ – момент на валу электродвигателя (ЭД); K_m – коэффициент момента; K_{ω} – коэффициент ЭДС; $K_{бУд}$ – коэффициент передачи блока управления двигателем; ω_i – угловая скорость вращения ЭД; H_a – глубина погружения аппарата; M_n – нагрузочный момент насоса; K_n – коэффициент влияния глубины погружения на M_n ; J_{Σ} – суммарный момент инерции, приведенный к валу ЭД.

■ Расчет параметров насосной станции

Основным элементом СРПД является насосная станция, которая должна обеспечить необходимое давление рабочей жидкости и

скорость ее перетекания в емкости с изменяемым объемом. Критерии выбора гидравлического насоса и его электропривода определяют максимальная рабочая глубина H_{max} и требуемая скорость изменения объемов. Задавшись максимальной рабочей глубиной и конкретной моделью насоса, можно определить требуемый максимальный момент на его валу [6]:

$$M_{эд} = \frac{w_n \cdot P_n}{20 \cdot \pi \cdot \eta_m} = \frac{w_n \cdot H_{max} \cdot 0,097}{20 \cdot \pi \cdot \eta_m}, \quad (12)$$

где: P_n – давление насоса в Бар; η_m – механический КПД насоса. Частота вращения насоса определяется

требуемым максимальным расходом (скоростью наполнения емкостей СРПД) по соотношению [6]:

$$n_{эд} = \frac{q_v \cdot 1000}{w_n \cdot \eta_v}, \quad (13)$$

где: q_v – требуемый расход насоса в л/мин; η_v – объемный КПД насоса. Технические требования к электроприводу гидравлического насоса типа Duplomatic 1P 2,5 R 11N ($w_n = 1,6 \text{ см}^3/\text{об}$, $\eta_v = 0,94$, $\eta_m = 0,92$, $n_{max} = 6000 \text{ об/мин}$, $P_{max} = 230 \text{ Бар}$), обеспечивающему расход $q_v = 4 \text{ л/мин}$ на глубине погружения $H_{max} = 150 \text{ м}$, сведены в табл. 2.

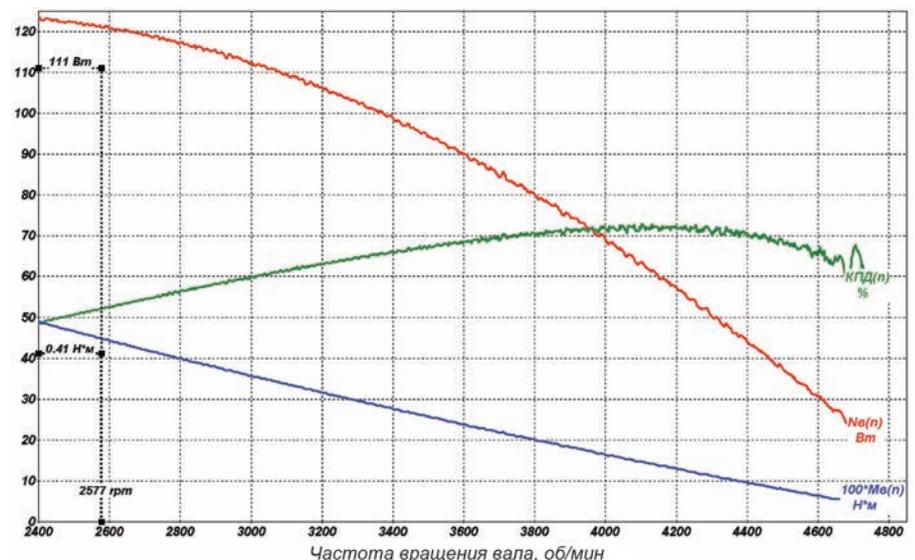


Рис. 8. Результаты нагрузочных испытаний электропривода на базе JK42BLS03

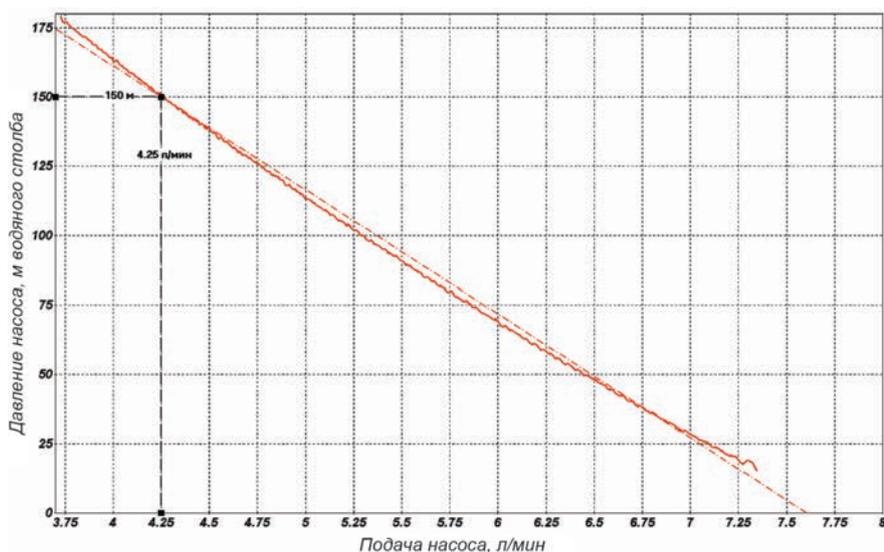


Рис. 9. Напорно-расходная характеристика насосной станции СРПД

Таблица 2. Требования к электроприводу насоса СРПД

Параметр	Значение
Момент при $H_a=150$ м, Н·м	0,412
Обороты при расходе $q_v=4$ л/мин, об/мин	2577

Анализ результатов нагрузочных испытаний бесколлекторного электродвигателя JK42BLS03 ($n_n=4000$ об/мин, $M_n=0,185$ Н·м, $N_n=78$ Вт), графики которых приведены на рис. 8, подтверждает возможность его использования в качестве привода выбранного насоса.

В ходе подстановки результатов нагрузочных испытаний электропривода в соотношения (12) и (13), разрешенные относительно давления H_a и расхода q_v

$$H_a = \frac{M_{эд} \cdot 20 \cdot \pi \cdot \eta_m}{w_n \cdot 0,097}, \quad (14)$$

$$q_v = \frac{n_{эд} \cdot w_n \cdot \eta_v}{1000}$$

была определена напорно-расходная характеристика насосных станций СРПД, приведенная на рис. 9.

В соответствии с уравнением (12) может быть определен коэффициент K_n , определяющий

влияние глубины погружения на момент нагрузки электропривода насоса:

$$M_n = \frac{w_n \cdot 0,097}{20 \cdot \pi \cdot \eta_m} \cdot H_a = K_n \cdot H_a. \quad (15)$$

■ Моделирование режимов работы СРПД

Целью моделирования является:

- подтверждение правильности формирования управляющих воздействий Q_Σ и M_Q ;
- исследование возможности «бесшумной» стабилизации глубины погружения ИСБ;
- моделирование режимов «бесшумного» движения ИСБ по модели использования.

На основании выражений (7)–(11) средствами приложения Simulink была разработана математическая модель СРПД, структура которой приведена на рис. 10.

В табл. 3 сведены параметры, принятые при моделировании СРПД.

На основании анализа результатов проведенного моделирования СРПД для различных значений заданных $Q_{\Sigma 3}$ и M_{Q3} можно сделать следующие выводы:

- в пределах ограничений (9) и (10) установившиеся значения управляющих воздействий соответ-

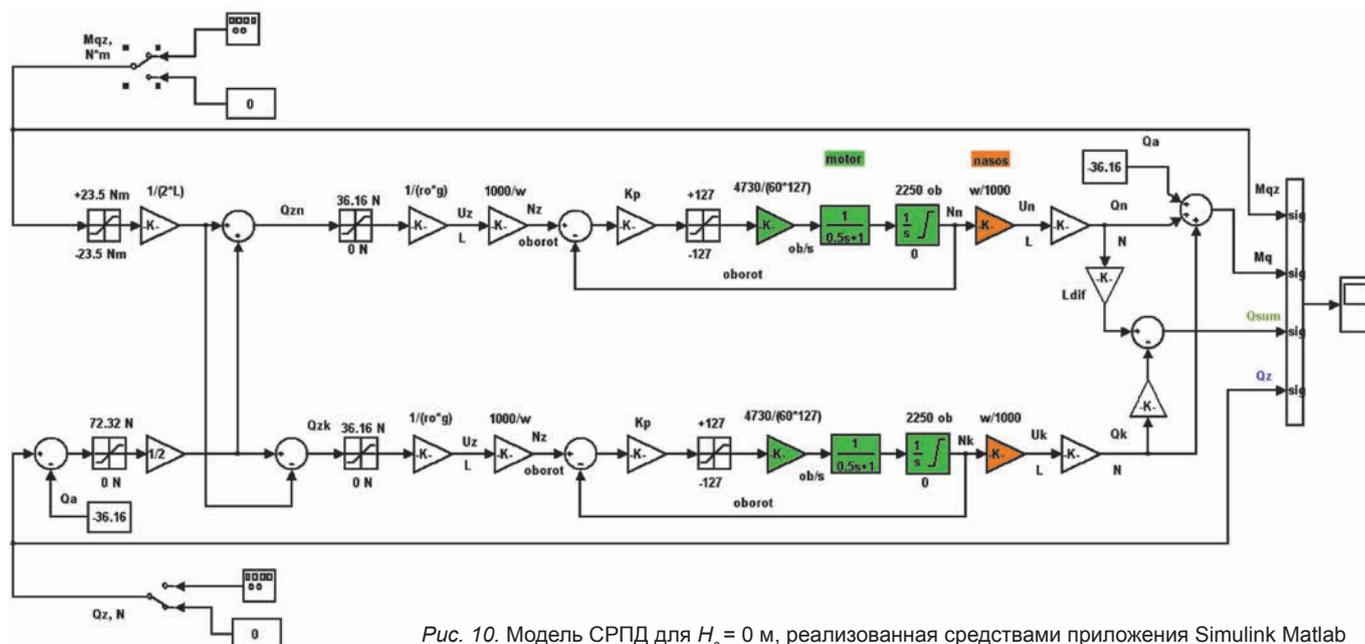


Рис. 10. Модель СРПД для $H_g = 0$ м, реализованная средствами приложения Simulink Matlab

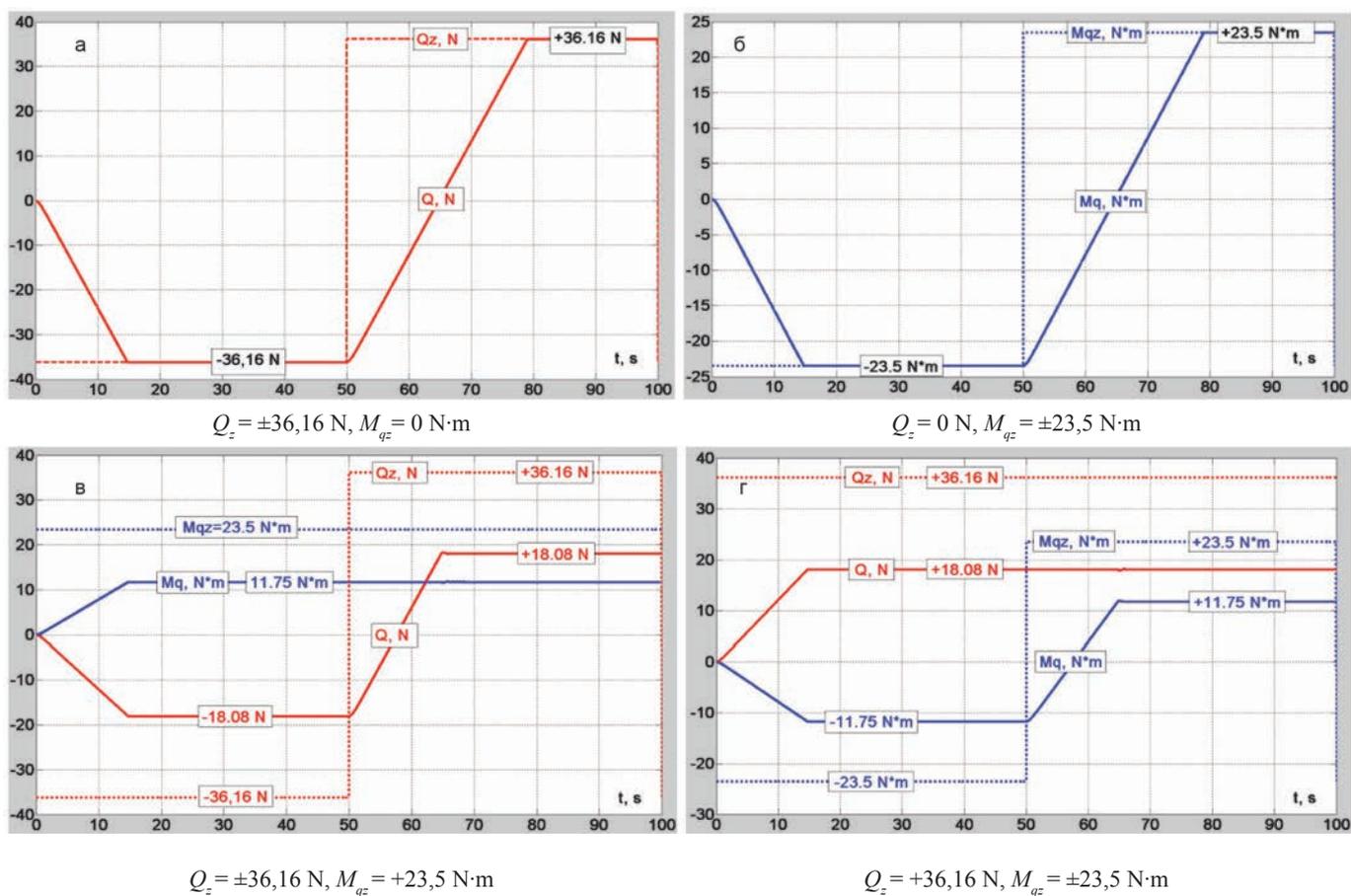


Рис. 11. Результаты моделирования работы СРПД при отработке различных сочетаний заданных значений плавучести и момента для $H_a = 0$

Таблица 3. Параметры модели СРПД

Параметр	Значение
Остаточная плавучесть аппарата без учета СРПД $Q_a, \text{ N}$	-36,16
Диапазон изменения объема одной секции СРПД $U_{\text{max}}, \text{ дм}^3$	0÷3,6
Плечо дифференцирующего момента $l_p, \text{ м}$	0,65
Максимальные обороты привода насоса при $H_a=0 \text{ м}$, об/мин	4900
Максимальные обороты привода насоса при $H_a=150 \text{ м}$, об/мин	2950
Объем насоса $w_n, \text{ см}^3/\text{оборот}$	1,6
Объемный КПД насоса η_v	0,94
Механический КПД насоса η_m	0,92
Коэффициент регулятора числа оборотов насоса k_p	100
Электромагнитная постоянная времени привода насоса $T_{zm}, \text{ с}$	0,25
Плотность морской воды $\rho_{sw}, \text{ кг/м}^3$	1025

ствуют заданным значениям (графики а–б рис. 11), а время переходного процесса составляет 30 с;

- в случае одновременного задания максимальных значений $Q_{\Sigma Z}$ и M_{QZ} принятый алгоритм «равноправного» распределения команд между секциями СРПД снижает в два раза сформированные Q_{Σ} и M_Q и время переходного процесса (графики в–г рис. 11);

- разработанная математическая модель СРПД может быть использована для исследования «бесшумного» регулирования движения подводного аппарата или ИСБ.

Динамику вертикального движения аппарата с учетом отсутствия скоростей движения в горизонтальной плоскости при нулевых статических углах крена и дифферента можно представить следующими соотношениями [7]:

$$(M_a + \lambda_{22}) \cdot \ddot{H}_a + K_{zc} \cdot \dot{H}_a \cdot \left| \dot{H}_a \right| = Q_{\Sigma},$$

$$K_{zc} = C_y(\alpha) \cdot \frac{\rho_{sw} \cdot \dot{H}_a^2}{2} \cdot U_a^{2/3}, \quad (16)$$

$$Q_{\Sigma 3} = (H_3 - H_a) \cdot K_{pH} - \dot{H}_a \cdot K_{pdH},$$

где: M_a – масса аппарата; λ_{22} – присоединенная масса воды; H_a , H_3 – текущая и заданная глубина погружения соответственно; K_{zc} – коэффициент гидродинамического сопротивления; $C_y(\alpha)$ – коэффициент гидродинамического сопротивления цилиндрического корпуса аппарата поперечному обтеканию; K_{pH} , K_{pdH} – коэффициенты ПД – регулятора глубины.

Для моделирования процессов управления были приняты параметры, приведенные в табл. 4, а структурная схема и результаты вертикального моделирования приведены на рис. 12–14.

Таблица 4. Параметры модели вертикального движения ИСБ

Параметр	Значение
Масса аппарата с учетом присоединенной $M_a + \lambda_{22}$, кг	200
Коэффициент гидродинамического сопротивления C_y	1,2
Водоизмещающий объем аппарата U_a , м ³	0,10
Коэффициент влияния глубины на производительность насосов K_H , Н·м/м	$2,75 \cdot 10^{-3}$

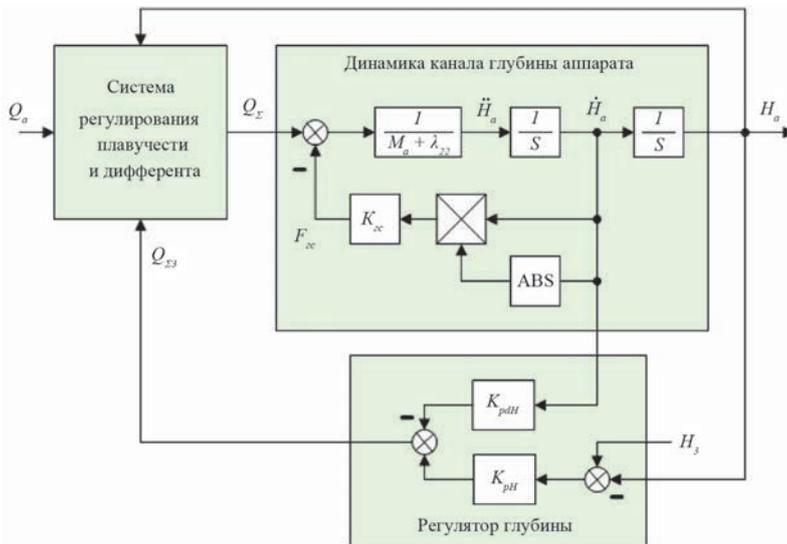


Рис. 12. Структурная схема моделирования вертикального движения аппарата под управлением СРПД

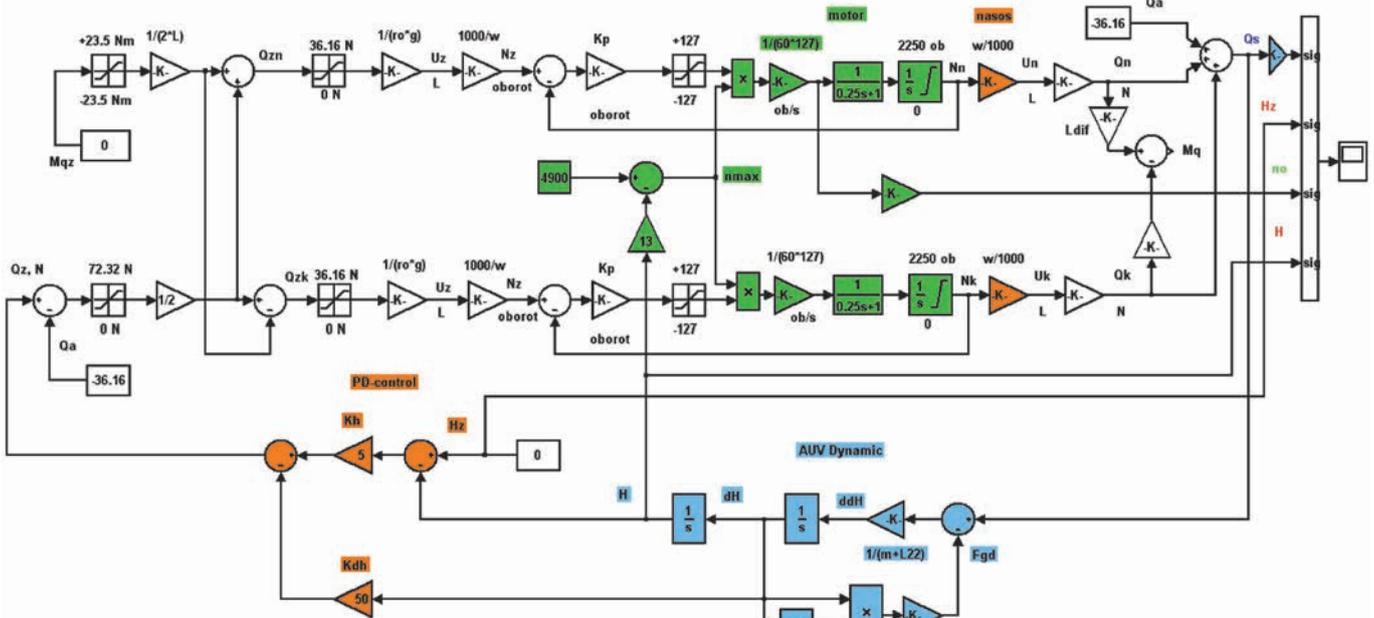
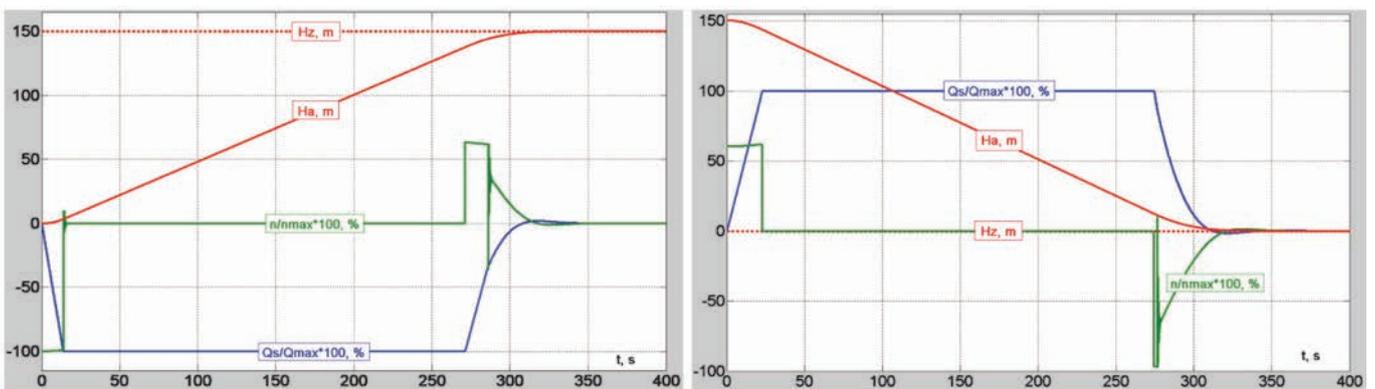


Рис. 13. Модель вертикального движения аппарата под управлением СРПД



$H_a(0) = 0$ м, $H_3 = 150$ м

$H_a(0) = 150$ м, $H_3 = 0$ м

Рис. 14. Переходные процессы вертикального движения и стабилизации глубины погружения АНПА системой регулирования плавучести ($K_{pH} = 5$ Н/м, $K_{pH} = 50$ Н·с/м)

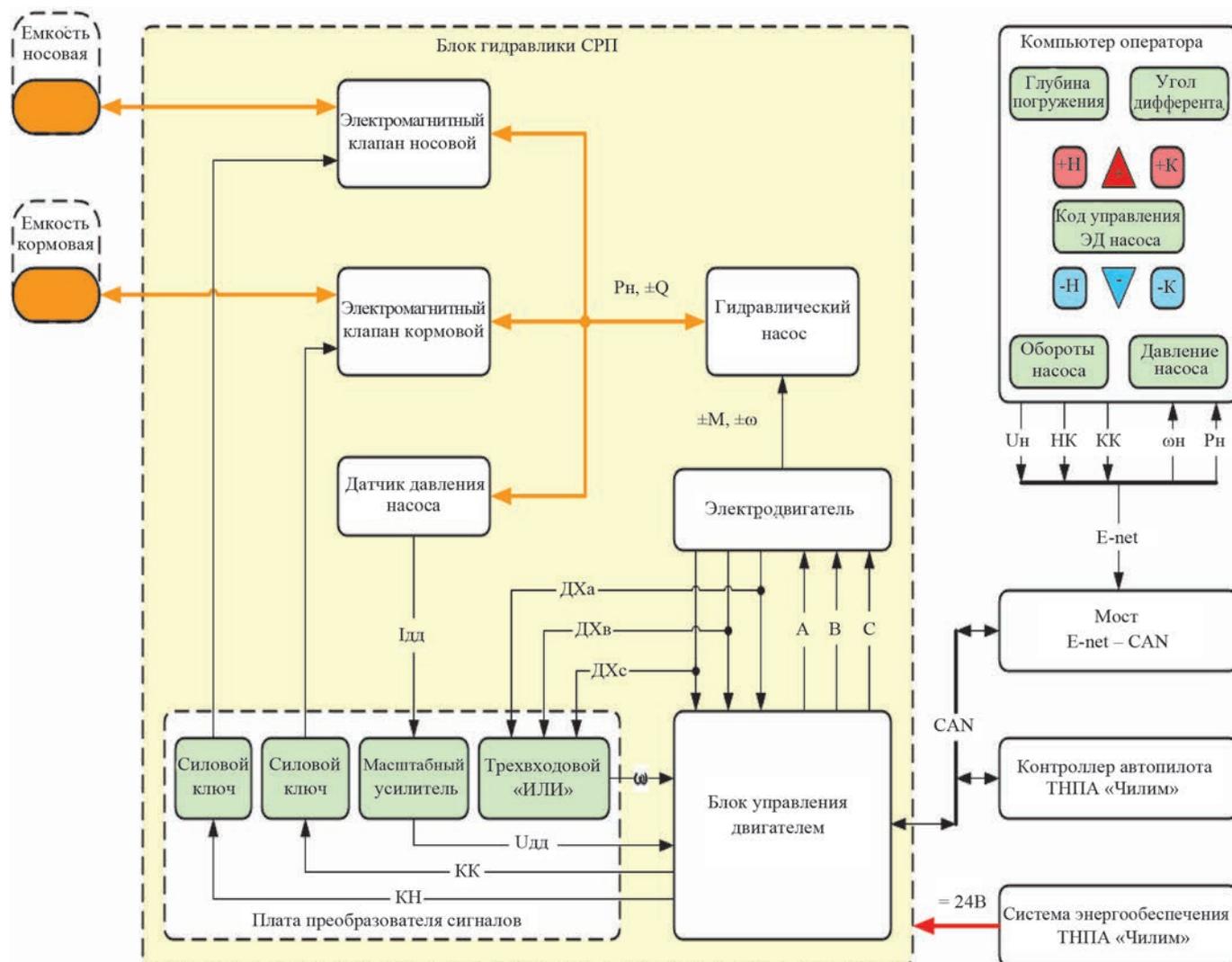


Рис. 15. Функциональная схема системы регулирования плавучести в составе ТНПА «Чилим»

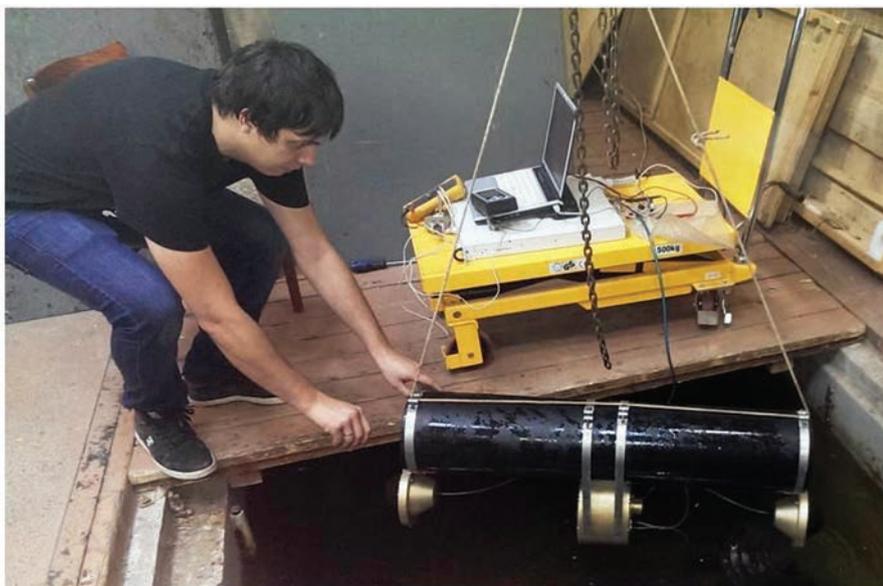


Рис. 16. Фрагмент бассейновых испытаний макета SRPD

■ Разработка и испытание макетного образца SRPD

В течение 2015 года в ИПМТ был разработан, изготовлен и прошел комплекс испытаний в составе ТНПА «Чилим» макет системы регулирования плавучести [8]. Макетный образец SRPD состоял из одного блока гидравлики с электрогидравлической насосной станцией и двух емкостей, объем которых регулировался независимо друг от друга. Функциональная схема системы приведена на рис. 15.

В июле 2015 года были проведены бассейновые испытания

макета малогабаритной СРПД (рис. 16). Результаты испытаний показаны на рис. 17 и сведены в табл. 5.

Натурные испытания макета СРПД в составе ТНПА «Чилим» проводились в сентябре 2015 г. (рис. 18). В ходе испытаний

были подтверждены работоспособность макета и правильность выбранных технических решений. При этом успешно реализованы режимы «бесшумного» погружения/всплытия и зависания ИСБ в течение длительного времени.

Результаты натурных испытаний СРПД представлены графически на рис. 19, 20.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены вопросы разработки системы регулирования плавучести и дифферента малогабаритного подводного аппарата, являющегося носителем гидроакустической аппаратуры, требующей минимального уровня собственных шумов носителя.

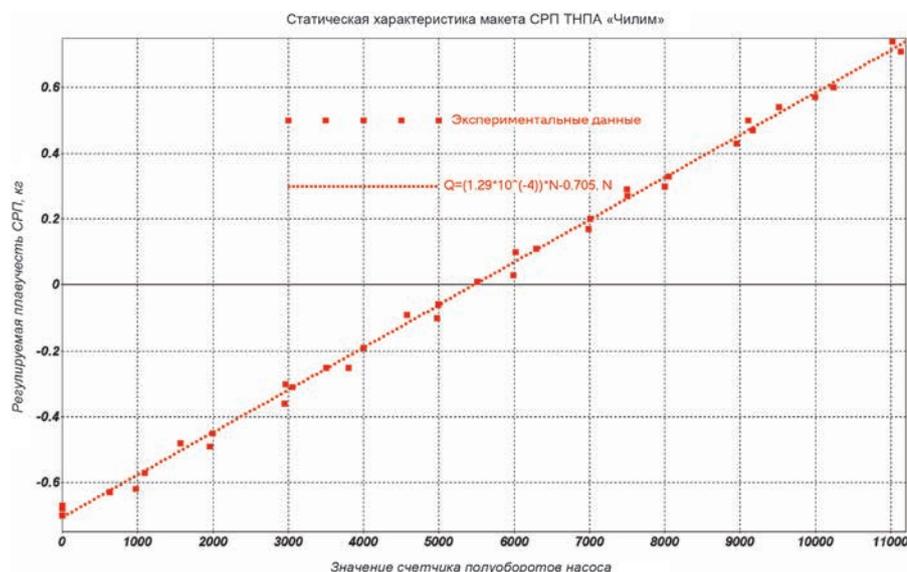


Рис. 17. Калибровочная характеристика СРПД

Таблица 5. Результаты бассейновых испытаний макета СРПД

Параметр	Значение	
	Пресная вода $\rho_w=1000 \text{ кг/м}^3$	Морская вода $\rho_{sw}=1025 \text{ кг/м}^3$
Максимальное изменение плавучести, Н	14,0	14,4
Максимальный дифференцирующий момент, Н·м	$\pm 1,1$	$\pm 1,3$
Максимальное время накачки на глубине 1 м, с	50	
Максимальная рабочая глубина, м	440	
Максимальное время накачки на глубине 150 м, с	100	

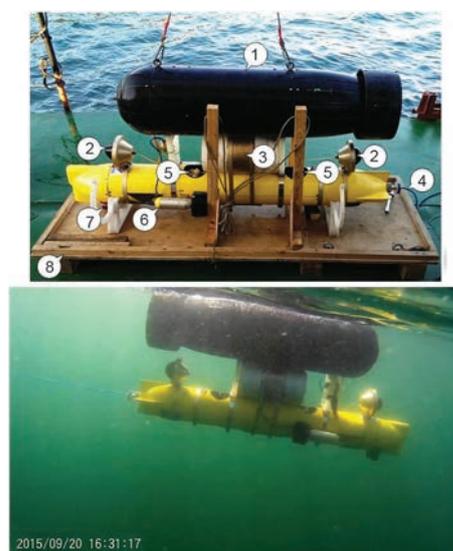


Рис. 18. Фрагменты натурных испытаний макета СРПД в составе ТНПА «Чилим»: 1 — блок полезной нагрузки; 2 — мембраны изменяемого объема; 3 — блок гидравлики СРПД; 4 — оптический кабель связи; 5 — вертикальные движители; 6 — горизонтальные движители; 7 — гидролокатор секторного обзора (ГСО); 8 — ложемент

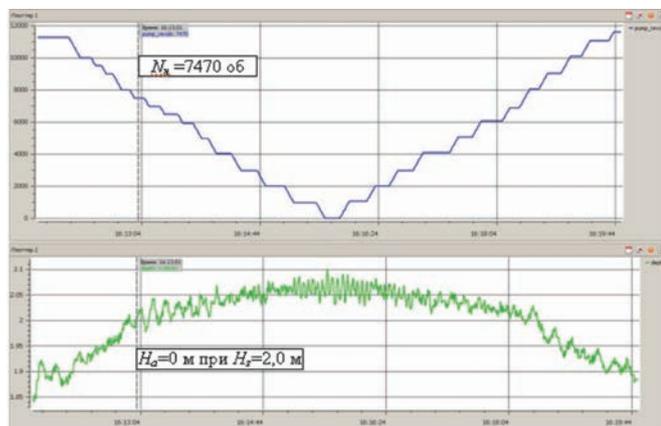


Рис. 19. Зависимость ошибки стабилизации глубины погружения вертикальными движителями от числа оборотов насоса СРПД

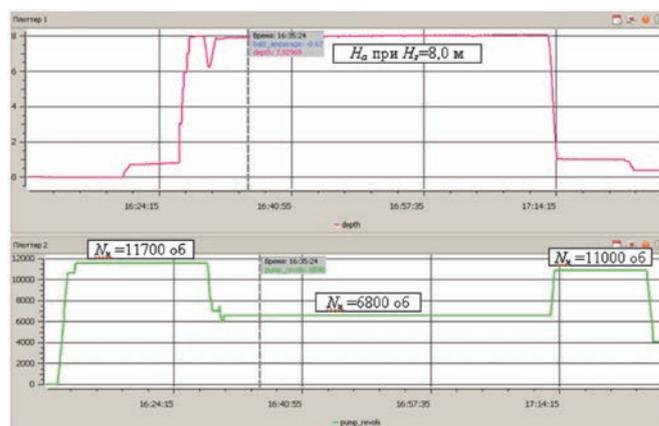


Рис. 20. Графики глубины погружения и оборотов насоса в режиме бесшумного зависания ТНПА «Чилим» на глубине 8 м в течение 45 минут

В результате проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы:

- возможность регулирования плавучести и угла дифферента АНПА реализуется компоновочной схемой СРПД с двумя емкостями независимо регулируемого объема, которые должны быть симметрично разнесены относительно центра масс аппарата;
- необходимый диапазон изменения плавучести и угла дифферента малогабаритного АНПА с водоизмещением 0,1 м³ обеспечивается двумя емкостями с максимальным регулируемым объемом каждой не более 0,004 м³;

- разработаны алгоритмы управления системой, обеспечивающие независимость управления остаточной плавучестью и углом дифферента, на основании оценки регулируемых объемов рабочей жидкости в зависимости от числа оборотов насоса;

- при построении адекватной математической модели системы учтены не только экспериментальные характеристики электропривода, но и влияние глубины погружения аппарата на производительность насосов;

- для рассматриваемого варианта системы производительность ее насосов на глубине 150 м со-

ставляет 65% от максимального значения на поверхности;

- в результате проведенного моделирования установлена возможность бесшумной стабилизации глубины, для реализации которой достаточно несложного ПД-регулятора;

- в процессе испытаний экспериментального образца системы была выполнена ее калибровка в бассейне и подтверждена возможность бесшумной стабилизации глубины погружения подводного аппарата в природных условиях.



ЛИТЕРАТУРА

1. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. Unesco technical papers in marine science 44, Unesco 1983. 58 p. URL: <http://unesdoc.unesco.org/images/832eb.pdf>.
2. Щуров В.А., Щеглов С.Г., Иванов Е.Н. Мобильные акустические комбинированные приемные системы на основе автономных обитаемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. 2012. № 2 (14). С. 4–12.
3. Tangirala S., Dzielski J.A. Variable Buoyancy Control System for a Large AUV // IEEE Journal of oceanic engineering. 2007. N 32(4). P. 762–771.
4. Hendricks A. Automated Buoyancy Control system for the Remotely Operated Sea Crawler / Florida Inst. of Tech. Melbourne, FL, 2014. 185 p.
5. Harold Franklin Jensen III. Variable Buoyancy System Metric^ Report Master of Science in Mechanical Engineering. Massachusetts: Institute of Technology, 2009. 112 p.
6. Галдин Н.С. Основы гидравлики и гидропривода: учеб. пособие. Омск: Изд-во СиБ-АДИ, 2006. 145 с.
7. Пантов Е.Н., Махин Н.Н., Шереметов Б.Б. Основы теории движения подводных аппаратов. Л.: Судостроение, 1973. 209 с.
8. Гой В.А., Костенко В.В. Малогабаритная система регулирования плавучести // Материалы 6-й науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана», Владивосток: Дальнаука, 2015. С.113–117.