На правах рукописи

КОНОПЛИН Александр Юрьевич

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОДВОДНОГО АППАРАТА В РЕЖИМЕ ЗАВИСАНИЯ ПРИ РАБОТАЮЩЕМ МНОГОЗВЕННОМ МАНИПУЛЯТОРЕ

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владивосток - 2015

Работа выполнена в лаборатории робототехнических систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН.

Научный руководитель: Филаретов Владимир Федорович,
доктор технических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки РФ,
Заслуженный изобретатель РФ,
заведующий лабораторией робототехнических систем
ИАПУ ДВО РАН, г. Владивосток

Официальные оппоненты: Французова Галина Александровна,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры автоматики, Новосибирский
государственный технический университет,
г. Новосибирск

Костенко Владимир Владимирович,
кандидат технических наук, заведующий
лабораторией исполнительных устройств и систем
телеуправления, Институт проблем морских
технологий ДВО РАН, г. Владивосток

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Московский
государственный технологический университет
«СТАНКИН», г. Москва

Защита состоится «22» мая 2015 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 005.007.01 при Институте автоматики и процессов управления ДВО РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАПУ ДВО РАН и на сайте http://www.iacp.dvo.ru/russian/institute/dissertation/represent.html

Автореферат разослан « » марта 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 005.007.01,
к.т.н. Н.Н. Петрунько

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. При освоении Мирового океана существует проблема качественного выполнения различных технологических операций с помощью подводных аппаратов (ПА), оснащенных многозвенными подводными манипуляторами (ПМ). Эти операции во многих случаях требуется выполнять быстро в режиме зависания ПА над или вблизи объекта работ, так как время подводных работ часто ограничено, а их стоимость очень высока.

В настоящее время уже разработаны подходы, позволяющие обеспечивать высокоточную навигацию и управление ПА и установленными на них ПМ. Значительный вклад в создание и развитие этих подходов внесли отечественные и зарубежные ученые М.Д.Агеев, А.В.Лебедев, В.Ф.Филаретов, В.А.Челышев, А.Ф.Шербатюк, Д.А.Юхимец, В.В.Костенко, В.С.Ястребов, K.R.Goheen, M.W.Spong, T.J.Tarn, T.I.Fossen, R.Eustice, J.Horgan и др. Однако в процессе перемещения ПМ в водной среде со стороны этого манипулятора на ПА начинают действовать значительные силовые и моментные воздействия, обусловленные не только инерционными и гравитационными силами, но также и силами, определяемыми взаимодействием движущегося ПМ с окружающей вязкой средой. Кроме того, на ПА оказывают влияние течения, волнения моря и др. Все это приводит к незапланированному смещению зависшего в толще воды ПА относительно его исходного положения и препятствует качественному выполнению многих манипуляционных задач.

В результате возникает задача разработки таких новых подходов и методов, которые позволяли бы автоматически стабилизировать положение и ориентацию ПА при работающем ПМ, а также обеспечивать высокоточное перемещение рабочего органа (РО) этого ПМ по заданной пространственной траектории даже в условиях неизбежных (но незначительных) смещений ПА от его исходного положения в пространстве.

Цель и задачи работы. Целью диссертации является разработка и исследование методов синтеза высокоточных систем автоматического управления и стабилизации ПА в режиме их зависания в заданной точке пространства при работающих ПМ, а также методов автоматического управления режимами движения РО этих ПМ для более точного и быстрого выполнения различных технологических операций.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- разработать метод точной стабилизации ПА в режиме его зависания над или вблизи объекта работ при работающем манипуляторе;
- разработать метод синтеза системы автоматического управления режимом движения РО ПМ, установленного на ПА, для точного выполнения технологических операций;
- разработать эффективный алгоритм решения обратной задачи динамики (ОЗД) для многостепенного ПМ, звенья которого совершают произвольные движения в водной среде;

- экспериментально определить параметры вязкого трения при произвольном перемещении звеньев ПМ под водой.

Методы исследования. В процессе выполнения диссертации использовались методы теории автоматического управления, дифференциальных уравнений, теоретической механики, численного моделирования разработанных систем управления, а также методы проведения аэродинамических и гидродинамических экспериментов.

Научная новизна.

1. Предложен метод синтеза комбинированной автоматической системы стабилизации ПА в режиме зависания, включающей в себя разомкнутый контур, обеспечивающий подачу на движители ПА сигналов, пропорциональных вычисленному силовому и моментному воздействию со стороны работающего манипулятора, и следящую систему, компенсирующую неточности указанных вычислений.

2. Разработана модификация рекуррентного алгоритма решения ОЗД для ПМ, учитывающая особенности влияний вязкой среды на звенья этого ПМ, совершающие произвольные движения в пространстве.

3. Предложен метод синтеза системы автоматической коррекции программной траектории движения РО ПМ, установленного на ПА, позволяющей с высокой точностью выполнять манипуляционные операции в режиме зависания ПА вблизи объекта работ, компенсируя с помощью дополнительных движений ПМ ошибки отработки его РО предписанных траекторий, вызванные незапланированным, но незначительным смещением ПА в пространстве.

4. Предложен метод синтеза системы автоматического управления режимом движения РО ПМ, автоматически формирующей такую максимально возможную текущую программную скорость перемещения этого РО вдоль сложных пространственных траекторий, при которой он не отходит от этих траекторий на расстояние, превышающее допустимое.

5. Предложен подход к экспериментальному определению переменных коэффициентов вязкого трения, величины которых зависят от параметров движения звеньев ПМ в вязкой среде.

Обоснованность и достоверность результатов работы. Обеспечивается корректным применением использованных в работе теоретических методов и подтверждается полученными в диссертации результатами численных и экспериментальных исследований.

Практическая значимость и реализация результатов работы. На основе разработанных в диссертации методов созданы легко реализуемые системы, позволяющие точно стабилизировать ПА вблизи объекта работ при работающем ПМ, а также обеспечивать высокую точность и максимально возможную скорость перемещения РО этих ПМ по произвольным пространственным траекториям. Эти систем управления манипуляционными ПА позволят не только добиться качественного выполнения существующих на сегодняшний день манипуляционных задач, но и значительно расширить круг работ, выполняемых ПА.

Полученные в диссертации результаты использованы в учебном процессе Дальневосточного федерального университета (при подготовке бакалавров по направлению 221000.62 – «Мехатроника и робототехника»), а также в морских экспедиционных работах с телеуправляемыми подводными аппаратами Института биологии моря ДВО РАН.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на 7-й научно-технической конференции «Мехатроника, автоматизация, управление» (Санкт-Петербург, 2010 г.), 4-ой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2011 г.), Всероссийском конкурсе научно-исследовательских работ студентов, аспирантов и молодых ученых по нескольким междисциплинарным направлениям (Новочеркасск, 2011 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург, 2012 г., 2014 г.), 10-й Международной научно-практической конференции «Проблемы транспорта Дальнего востока» (Владивосток, 2013 г.), 56-й Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы естествознания» (Владивосток, 2013 г.), XII Всероссийском совещании по проблемам управления (Москва, 2014 г.), 7-й Российской мультиконференции по проблемам управления (РМКПУ-2014) (Санкт-Петербург, 2014 г.), 2nd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM 2014) (Tehran Iran, 2014 г.), 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation (Vienna Austria, 2014 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 4 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 3 патента на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 111 наименований. Основное содержание работы изложено на 110 страницах машинописного текста. Работа содержит 36 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность разработки высокоточных систем стабилизации ПА в режиме их зависания вблизи объектов работ при работающих ПМ, сформулированы цели исследования, дано общее содержание, характеристика и результативность исследований, выполненных в диссертационной работе.

В первой главе проведен анализ подводных манипуляционных операций, качественное выполнение которых осуществляется в режиме зависания ПА вблизи объектов работ. Приведены результаты детального анализа существующих методов и подходов к обеспечению стабилизации положения и ориентации ПА в заданной точке пространства. Выявлены особенности и недостатки этих подходов и методов, не позволяющие обеспечить их эффективное применение при выполнении манипуляционных операций в режиме зависания ПА.

На основе проведенного анализа было определено, что решить задачу обеспечения высокоточной стабилизации ПА в режиме их зависания при работающих ПМ можно с помощью известной разомкнутой системы компенсации

движителями ПА силовых и моментных воздействий со стороны работающего ПМ, непрерывно вычисляемых в реальном масштабе времени. Однако для расчета воздействий ПМ на ПА в известных работах используется рекуррентный алгоритм решения ОЗД ПМ, предназначенный только для малых чисел Рейнольдса, т.е. для малых скоростей перемещения ПМ, при которых еще действует принцип суперпозиции этих воздействий на его звенья со стороны вязкой среды ввиду линейной зависимости указанных воздействий от скоростей движения всех звеньев ПМ. Современные ПМ могут перемещаться с высокими скоростями, когда принцип суперпозиции для них нарушается, и существующий алгоритм уже не позволяет правильно вычислять искомые силовые и моментные воздействия. Исходя из этого, для вычисления и последующей компенсации движителями ПА негативных воздействий со стороны ПМ в диссертации предлагается разработать рекуррентный алгоритм решения ОЗД для ПМ, перемещающегося в водной среде с высокой скоростью, который может учитывать и линейную, и квадратичную зависимости этих воздействий от скорости движения звеньев ПМ. Кроме того, для увеличения точности вычислений предполагается экспериментально определить и использовать в расчетах все переменные коэффициенты вязкого трения.

Однако выполнить точный расчет силовых и моментных воздействий на этот ПА со стороны движущегося ПМ невозможно в силу приближенности определения параметров его взаимодействий с окружающей водной средой и механических параметров самой конструкции ПМ. Это может привести к значительному снижению точности стабилизации ПА при использовании разомкнутых систем управления. Поэтому для увеличения точности этой стабилизации планируется синтезировать комбинированную систему, включающую в себя указанный выше разомкнутый контур и дополнительные замкнутые по всем его линейным и угловым перемещениям автоматические системы, которые могут использовать высокоточные навигационные бортовые датчики и приборы.

Поскольку даже комбинированная система стабилизации в силу неизбежных ошибок навигационных приборов, инерционности ПА и динамических запаздываний в работе его движителей неспособна точно зафиксировать ПА в пространстве, то даже незначительные смещения ПА от его исходного положения неизбежно повлекут за собой отклонения РО ПМ от предписанных пространственных траекторий. Для сохранения заданной точности движения РО ПМ, установленного на ПА, в диссертации предлагается синтезировать систему непрерывной автоматической коррекции программной траектории движения этого органа с учетом незапланированных смещений ПА от его исходного положения.

Кроме того, для увеличения скорости выполнения подводных технологических операций в главе обосновывается необходимость разработки метода синтеза системы управления режимом движением РО ПМ, автоматически формирующей такую максимально возможную текущую программную скорость перемещения этого органа вдоль сложных пространственных траекторий, при которой он не отходит от этих траекторий на расстояние, превышающее допустимое.

Во второй главе разработан рекуррентный алгоритм решения ОЗД для ПМ, способного перемещаться в водной среде с высокой скоростью. При этом учитывалось, что каждая элементарная часть длиной δh_i^* звена i ПМ, имеющего n степеней подвижности, может иметь различную поперечную скорость движения относительно покоящейся жидкости не только по величине, но и по направлению. Кроме того, сила, действующая на эту элементарную часть со стороны вязкой среды, может иметь линейную или квадратичную зависимости от величины скорости движения этой части в водной среде. Поэтому каждое звено ПМ разбивалось на N указанных элементарных частей, а суммарная сила, действующая на звено i, определялась как сумма сил, приложенных к каждой элементарной части j этого звена $j = \overline{1,N}$.

В результате модификация алгоритма решения ОЗД для ПМ имеет вид

$$\omega_i = A_i^{i-1} \cdot \omega_{i-1} + e_i \cdot \dot{q}_i \cdot \overline{\sigma}_i,\ \omega_0 = \omega^*{}_0,\ i = \overline{1,n};$$

$$\dot{\omega}_i = A_i^{i-1} \cdot \dot{\omega}_{i-1} + [(A_i^{i-1} \cdot \omega_{i-1}) \times e_i \cdot \dot{q}_i + e_i \cdot \ddot{q}_i] \cdot \overline{\sigma}_i,\ \dot{\omega}_0 = \dot{\omega}^*{}_0,\ i = \overline{1,n};$$

$$\ddot{P}_i^{'} = A_i^{i-1} \cdot (\ddot{P}_{i-1}^{'} + \delta_{i-1} \cdot p_{i-1}^*) + (2\dot{q}_i \cdot \omega_i \times e_i + \ddot{q}_i \cdot e_i) \cdot \sigma_i,\ \ddot{P}_0^{'} = P_0^*,\ i = \overline{1,n};$$

$$\ddot{r}_{mi} = \ddot{P}_i^{'} + \delta_i \cdot r_i^*,\ i = \overline{1,n};$$

$$\mathrm{v}_i = A_i^{i-1} \cdot (\mathrm{v}_{i-1} + \omega_{i-1} \times p_{i-1}^*),\ \mathrm{v}_1 = \mathrm{v}_0,\ i = \overline{2,n};$$

$$\mathrm{v}_{Ai} = \mathrm{v}_i + \omega_i \times r_i^*,\ \psi_i = \arccos\frac{\mathrm{v}_{Ai} \cdot p_i^*}{|\mathrm{v}_{Ai}| \cdot |p_i^*|},\ i = \overline{1,n};$$

$$\alpha_i^* = \arccos\frac{\mathrm{v}_i \cdot p_i^*}{|\mathrm{v}_i| \cdot |p_i^*|},\ \beta_i^* = \arccos\frac{\omega_i \cdot p_i^*}{|\omega_i| \cdot |p_i^*|},\ i = \overline{1,n};$$

$$r_{pi} = r_i^* + K_{Ai} \cdot \mathrm{v}_{Ai},\ i = \overline{1,n};$$

$$\mathrm{v}_j^* = \mathrm{v}_i + \omega_i \times h_j^*,\ \omega_{Li} = |\omega_i| e_{Li} \cos\beta_i^*,\ i = \overline{1,n},\ j = \overline{1,N};$$

$$\mathrm{v}_{Li}^* = |\mathrm{v}_i| e_{Li} \cos\alpha_i^*,\ \mathrm{v}_{pj}^* = \mathrm{v}_j^* - \mathrm{v}_{Li}^*,\ i = \overline{2,n},\ j = \overline{1,N};$$

$$\mathrm{Re}_{Li} = \frac{\rho \mathrm{v}_{Li}^* l_i}{\eta},\ i = \overline{n,1};$$

$$\text{если } \mathrm{Re}_{Li} \le 10^3, \text{ то } F_{RLi} = k_{Li} \eta \mathrm{v}_{Li}^*,\ i = \overline{n,1};$$

$$\text{если } \mathrm{Re}_{Li} > 10^3, \text{ то } F_{RLi} = \frac{1}{2} \rho k_{Li} s_i \mathrm{v}_{Li}^{*\,2},\ i = \overline{n,1};$$

$$\mathrm{Re}_{pj} = \frac{2\rho \mathrm{v}_{pi}^* r_i}{\eta},\ i = \overline{n,1},\ j = \overline{1,N};$$

$$\text{если } \mathrm{Re}_{pj} \le 10^3, \text{ то } F_{Rpj} = k_i^* \eta \mathrm{v}_{pj}^*, i = \overline{n,1},\ j = \overline{1,N};$$

$$\text{если } \mathrm{Re}_{pj} > 10^3, \text{ то } F_{Rpj} = \frac{1}{2}\rho k_i^* r_i\, \delta h_i^*\ \mathrm{v}_{pj}^{*\,2}, i = \overline{n,1},\ j = \overline{1,N};$$

$$F_{Rpi} = \sum_{j=1}^{N} F_{Rpj}, i = \overline{n,1},\ j = \overline{1,N};$$

$$M_{Rpj} = h_j^* \times F_{Rpj},\ j = \overline{1,N};$$

$$M_{Rpi} = \sum_{j=1}^{N} M_{Rpj}, i = \overline{n,1},\ j = \overline{1,N};$$

$$M_{Li} = k_{Li}^* \eta r_i \omega_{\mathrm{Li}}, i = \overline{n,1};$$

$$F_i = A_i^{i+1} \cdot F_{i+1} + (m_i + \Pi_{mi}) \cdot \ddot{r}_{mi} + F_{RLi} + F_{Rpi},\ F_{n+1} = 0,\ i = \overline{n,1};$$

$$M_i = A_i^{i+1} \cdot M_{i+1} + p_i^* \times (A_i^{i+1} \cdot F_{i+1}) + r_i^* \times (m_i \cdot \ddot{r}_{mi}) + r_{pi} \times (\Pi_{mi} \cdot \ddot{r}_{mi}) + (\tau_i + T_i) \cdot \dot{\omega}_i +$$
$$+ \omega_i \times ((\tau_i + T_i) \cdot \omega_i) + M_{Rpi} + M_{Li},\ M_{n+1} = 0,\ i = \overline{n,1};$$

где $\delta_i = \begin{bmatrix} -(\omega_{i(2)}^2 + \omega_{i(3)}^2) & \omega_{i(1)} \cdot \omega_{i(2)} - \dot{\omega}_{i(3)} & \omega_{i(1)} \cdot \omega_{i(3)} + \dot{\omega}_{i(2)} \\ \omega_{i(1)} \cdot \omega_{i(2)} + \dot{\omega}_{i(3)} & -(\omega_{i(1)}^2 + \omega_{i(3)}^2) & \omega_{i(2)} \cdot \omega_{i(3)} - \dot{\omega}_{i(1)} \\ \omega_{i(1)} \cdot \omega_{i(3)} - \dot{\omega}_{i(2)} & \omega_{i(2)} \cdot \omega_{i(3)} + \dot{\omega}_{i(1)} & -(\omega_{i(1)}^2 + \omega_{i(2)}^2) \end{bmatrix}$ (нижний индекс элементов указывает на их номер в соответствующих векторах); $\mathrm{v}_i \in R^3$ - линейная скорость движения шарнира *i*; $\omega_i \in R^3$ - угловая скорость вращения звена *i*; $p_i^* \in R^3$ - вектор, совпадающий с продольной осью звена *i*, определяющий положение шарнира (*i* + 1) относительно шарнира *i*; $e_{Li} \in R^3$ - единичный вектор, направленный вдоль продольной оси звена *i*; $h_j^* \in R^3$ – вектор, определяющий центр масс элементарной части *j* звена *i* длиной δh_i^* относительно шарнира *i*; l_i и r_i –длина и радиус звена *i*, соответственно; A_i^{i-1} – матрица перевода векторов из (*i*-1) - й в *i* - ю систему координат (СК); $e_i = (0\ 0\ 1)^T$ – единичный вектор, направленный вдоль оси шарнира *i*; $\mathrm{v}_0 \in R^3$ - линейная скорость точки крепления ПМ к ПА; $\omega_0^* \in R^3$ - угловая скорость вращения ПА; q_i - обобщенная координата *i* манипулятора; $\mathrm{v}_j^* \in R^3$ - вектор линейной скорости движения центра масс каждого элемента *j* звена *i*; $\mathrm{v}_{Li}^* \in R^3$ и $\mathrm{v}_{pj}^* \in R^3$ - продольная и поперечная составляющие вектора v_j^*, соответственно; Re_{Li} и Re_{pj} – числа Рейнольдса при движении звеньев ПМ параллельно и перпендикулярно их продольным осям, соответственно; ρ и η – плотность и вязкость жидкости, соответственно; k_i^* и k_{Li} – экспериментально определяемые

коэффициенты; $s_i = \pi r_i^2$ - площадь основания цилиндрического звена *i*; $F_{Rpj} \in R^3$ - составляющая силы вязкого трения, действующая на соответствующую элементарную часть *j* звена *i*, направленная перпендикулярно продольной оси этого звена; $F_{RLi} \in R^3$ - составляющая силы вязкого трения, направленная вдоль продольной оси звена *i* ПМ; $M_{Rpj} \in R^3$ - момент, создаваемый силой F_{Rpj}; $F_{Rpi} \in R^3$ - суммарная сила, создаваемая силами F_{Rpj}; $M_{Rpi} \in R^3$ - момент, создаваемый силой F_{Rpi}; $\mathrm{v}_{Ai} \in R^3$ - линейная скорость центра величины звена *i*; $\sigma_i = 1$, если шарнир *i* поступательный и $\sigma_i = 0$, если он вращательный $(\overline{\sigma}_i = 1 - \sigma_i)$; m_i - масса звена *i*; $\dot{\omega}_i \in R^3$ – угловое ускорение звена *i*; $\omega_{Li} \in R^3$ - составляющая угловой скорости ω_i, параллельная продольной оси звена *i*; $M_{Li} \in R^3$ - момент, создаваемый вращением звена *i* со скоростью ω_{Li}; Π_{mi} - присоединенные к звену *i* массы жидкости; $\ddot{r}_{mi} \in R^3$ –линейное ускорение центра масс звена *i*; $r_{pi} \in R^3$ - вектор, задающий положение центра массы Π_{mi} относительно шарнира *i*; $r_i^* \in R^3$ - вектор, задающий положение центра масс звена относительно шарнира *i*; k_{Li}^* - экспериментально определяемый коэффициент; K_{Ai} - параметр, зависящий от $|\mathrm{v}_{Ai}|$ и угла ψ_i; $\tau_i \in R^{3\times3}$ - тензор инерции звена *i* относительно его центра масс; $T_i \in R^{3\times3}$ - тензор инерции массы жидкости, присоединенной к звену *i*; $F_i, M_i \in R^3$ –сила и момент этой силы, действующие в шарнире *i*, соответственно; $P_0^* = -g + \ddot{P}_{\text{ПА}}$, если центры масс всех звеньев ПМ не совпадают с их центрами величины; $P_0^* = g\left(\dfrac{w_i}{m_i} - 1\right) + \ddot{P}_{\text{ПА}}$, если центры масс всех звеньев совпадают с их центрами величины; $\ddot{P}_{\text{ПА}} \in R^3$ - линейное ускорение основания ПМ; g – ускорение свободного падения тела; w_i - масса жидкости, вытесненной звеном; $(\times)$ и $(\cdot)$ – векторное и скалярное произведения векторов, соответственно.

Таким образом, представленный рекуррентный алгоритм решения ОЗД для ПМ позволяет вычислить силу F_1 и момент M_1, с которыми движущийся ПМ воздействует на ПА в точке его крепления к этому аппарату. Указанные сила и момент должны быть скомпенсированы соответствующими упорами движителей ПА.

В этой же главе описан подход к экспериментальному определению коэффициента вязкого трения k^*, возникающего при поступательном перемещении звена ПМ в водной среде. На основе экспериментальных исследований определена зависимость указанного коэффициента от угла *Q* наклона звена к набегающему потоку жидкости.

Для определения величин k^* в аэродинамической трубе АС-1 Филиала ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» была создана экспериментальная установка (см.

рис. 1а), позволяющая определять коэффициенты k^* для бесконечно длинного цилиндрического звена ПМ с помощью метода импульсов (по Джонсу), соблюдая при этом подобие этого звена и его экспериментальной модели по числу Рейнольдса. Эти коэффициенты рассчитывались по формуле:

$$k^* = \frac{2}{D}\int_a^b \sqrt{\frac{\hat{P}_1 - \hat{p}_1}{\hat{P}_0 - \hat{p}_0}}\left(1 - \sqrt{\frac{\hat{P}_1 - \hat{p}_0}{\hat{P}_0 - \hat{p}_0}}\right) d\hat{Z} = \frac{2}{D}\int_a^b \varphi(\hat{Z}) d\hat{Z} = \frac{2S}{D}, \qquad (1)$$

где D – характерный размер тела; величины полного напора $\hat{P}_0$ и статического давления $\hat{p}_0$, определяемые пневмометром, расположенным перед моделью звена ПМ в невозмущенном потоке; $\hat{P}_1$ и $\hat{p}_1$ - величины полного напора и статического давления в спутном следе за звеном ПМ, соответственно (они определялись специальным пневмометром, который перемещался в этом следе по оси $\hat{Z}$, перпендикулярной вектору скорости $\upsilon \in R^3$ набегающего потока и лежащей в горизонтальной плоскости при вертикальном расположении звена на фиксированном расстоянии от его поверхности); a и b - границы спутного следа по оси $\hat{Z}$; S – площадь, ограниченная экспериментальной кривой $\varphi(\hat{z})$. При расположении звена ПМ под углом Q к набегающему потоку $D = \hat{d}/\sin Q$, где $\hat{d}$ - диаметр этого звена.

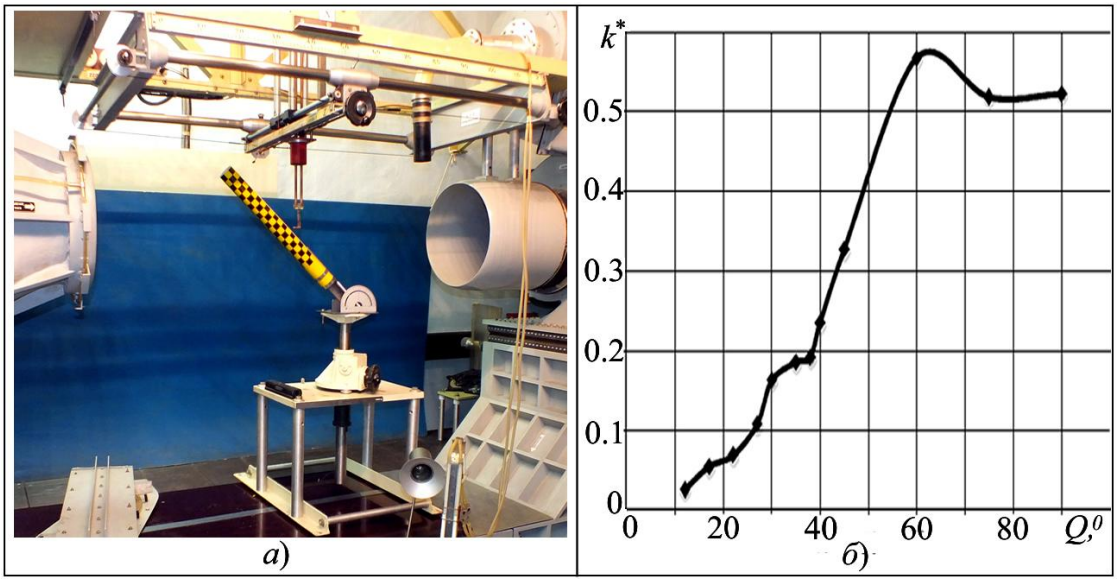

Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки и зависимость коэффициента k^* от угла Q

Характер зависимости коэффициента k^*, рассчитанного по формуле (1) для каждого положения звена ПМ, представлен на рис. 1б. Площадь S вычислялась методом графического интегрирования в разработанной компьютерной программе. Использование экспериментально определенного коэффициента k^* позволяет более

точно вычислять силу вязкого трения, действующую на любое звено ПМ, перемещающегося в водной среде.

В третьей главе описан метод синтеза комбинированной системы автоматической стабилизации положения и ориентации ПА в заданной точке пространства. Схема расположения движителей ПА, обеспечивающая его движение по шести степеням свободы, показана на рис. 2. На этом рисунке введены следующие обозначения: $P_i(i=\overline{1,6})-$ тяги движителей ПА, направления которых совпадают с продольными осями соответствующих движителей; *l*, *h*, *k*, *d* – геометрические параметры ПА и компоновки движителей. Первый поворотный шарнир ПМ установлен в точке *O*, которая является началом правой СК $X_1Y_1Z_1$. Для этой точки с помощью описанного выше алгоритма решения ОЗД ПМ вычисляются векторы силы F_1 и момента M_1, действующих на ПА со стороны работающего в водной среде ПМ. Пространственные перемещения ПА происходят в абсолютной СК XYZ.

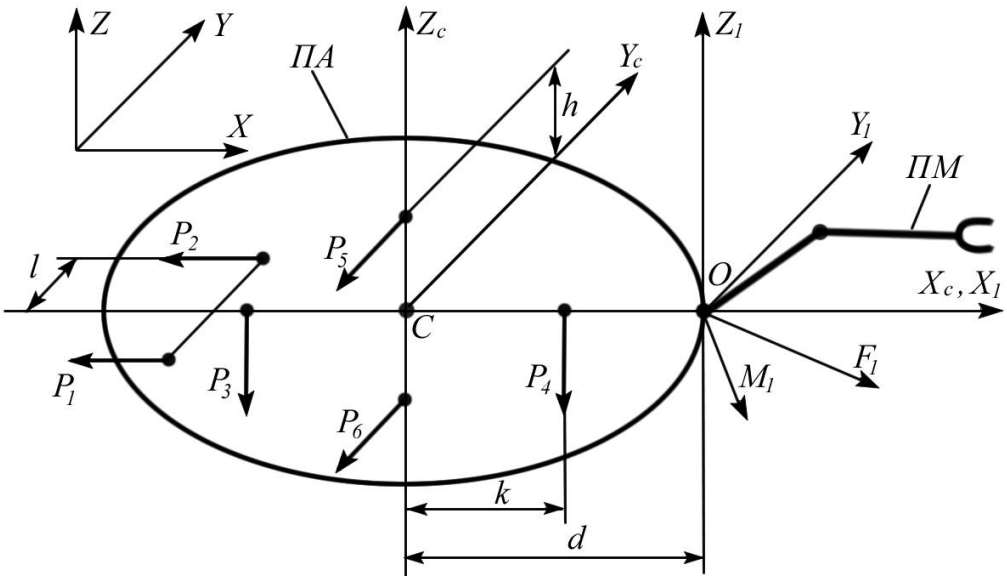

Рис. 2. Схема расположения движителей и манипулятор на ПА

Расчет тяг, создаваемых каждым движителем ПА для компенсации векторов F_1 и M_1, выполняется в связанной с ПА правой СК $X_cY_cZ_c$, центр которой располагается в точке *C*, совпадающей с центром тяжести (точкой симметрии) этого ПА, а оси этой СК, параллельные осям СК $X_1Y_1Z_1$, являются осями его симметрии. При этом оси X_c и X_1 совпадают. С учетом геометрических параметров ПА (см. рис. 2) требуемые значения тяг для каждого (из шести) движителя ПА рассчитываются с помощью выражений:

$$P_1=-\frac{F_{x1}}{2}-\frac{M_{z1}+dF_{y1}}{2l},\ P_2=-\frac{F_{x1}}{2}+\frac{M_{z1}+dF_{y1}}{2l},\ P_3=-\frac{F_{z1}}{2}+\frac{-M_{y1}+dF_{z1}}{2k},$$

$$P_4=-\frac{F_{z1}}{2}+\frac{M_{y1}-dF_{z1}}{2k},\ P_5=-\frac{F_{y1}}{2}+\frac{M_{x1}}{2h},\ P_6=-\frac{F_{y1}}{2}-\frac{M_{x1}}{2h},$$

где F_{x1}, F_{y1} и F_{z1} - проекции силы F_1, а M_{x1}, M_{y1} и M_{z1} - проекции момента M_1 на соответствующие оси СК $X_1Y_1Z_1$.

Реальное положение и ориентация ПА в абсолютной СК XYZ задается вектором $\hat{\eta} = [x, y, z, \gamma, \alpha, \beta]^T \in R^6$, где x, y, z - координаты положения точки C ПА; γ, α, β - углы его крена, дифферента и рысканья; $x_0, y_0, z_0, \gamma_0, \alpha_0, \beta_0$ - значения элементов вектора $\hat{\eta}$, которые необходимо стабилизировать.

Для принятой схемы установки движителей ПА (см. рис. 2) управление линейной x и угловой β координатами вектора η обеспечивается тягами P_1 и P_2, управление координатами z и α - тягами P_3 и P_4, а координатами y и γ - тягами P_5 и P_6. В связи с этим замкнутая система автоматической стабилизации ПА должна состоять из трех аналогичных одновременно работающих подсистем, каждая из которых управляет одной из трех пар соответствующих движителей.

В СК $X_cY_cZ_c$ со стороны движителей на ПА действуют результирующая сила $T_C = [T_{xc}, T_{yc}, T_{zc}]^T \in R^3$, где $T_{xc} = P_1 + P_2$, $T_{yc} = P_5 + P_6$, $T_{zc} = P_3 + P_4$, и момент $M_C = [M_{xc}, M_{yc}, M_{zc}]^T \in R^3$, где $M_{xc} = (P_6 - P_5)h,$; $M_{yc} = (P_3 - P_4)k$; $M_{zc} = (P_1 - P_2)l$, с помощью которых осуществляется стабилизация положения и ориентации ПА в заданной точке пространства.

На рис. 3 показана блок – схема одной из трех подсистем, стабилизирующей ПА по линейной x и угловой β координатам вектора $\hat{\eta}$ с помощью пары движителей Д1 и Д2, создающих тяги P_1 и P_2, соответственно. На этом рисунке R_x и R_β – синтезированные в диссертации регуляторы в цепях стабилизации линейного и углового перемещений ПА, соответственно; P_{0x} и $P_{0\beta}$ - желаемые значения тяг, необходимых для управления линейной x и угловой β координатами перемещения ПА, соответственно.

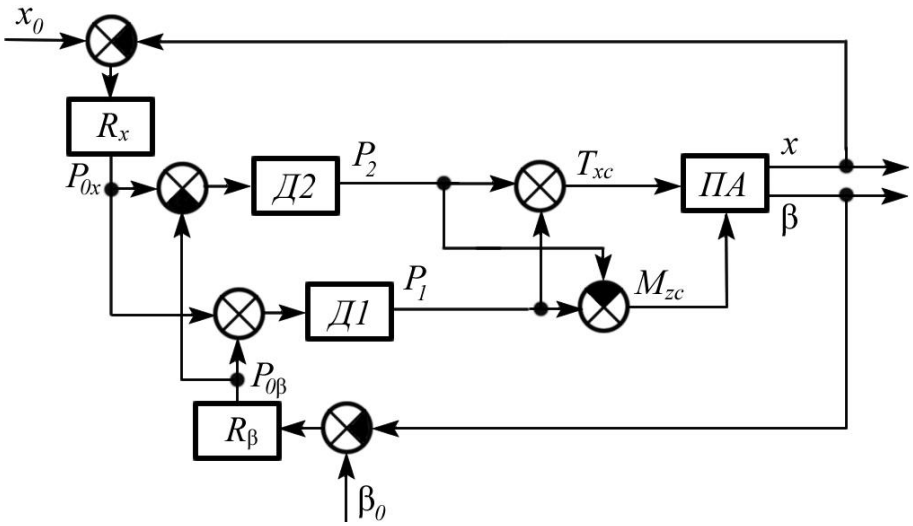

Рис. 3. Блок – схема типовой подсистемы автоматической системы стабилизации ПА по двум координатам

Подсистема (см. рис. 3) работает следующим образом. Поскольку для прямолинейного движения ПА по оси X СК XYZ необходимо вращение движителей Д1 и Д2 в одну сторону, то на эти движители подается сигнал P_{0x}. Для поворота ПА относительно оси Z вращение этих движителей должно происходить в разные стороны, поэтому на движители Д1 и Д2 подаются сигналы $P_{0\beta}$ и $-P_{0\beta}$, соответственно. Так как соответствующие линейные и угловые перемещения ПА осуществляются одновременно с помощью одной пары движителей, то на движители Д1 и Д2 подаются сигналы $P_{0x}+P_{0\beta}$ и $P_{0x}-P_{0\beta}$, соответственно. Эти сигналы формируют тяги P_1 и P_2 движителей, которые оказывают на ПА силовое T_{xc2} и моментное M_{zc} воздействия, благодаря которым осуществляется стабилизация его положения и ориентации в пространстве. Схемы построения остальных двух подсистем аналогичны.

Для исследования работы системы (см. рис. 3) было выполнено математическое моделирование режима стабилизации ПА в заданной точке пространства при работающем ПМ типа PUMA. При этом полагалось, что в начальный момент времени оси СК XYZ и $X_cY_cZ_c$ совпадают, а вектор $P^*(t)=[x^*, y^*, z^*]\in R^3$ задает текущее желаемое положение РО ПМ в СК XYZ.

Процессы изменения всех линейных и угловых координат ПА при линейном движении РО ПМ, описываемом уравнениями $\dot{x}^*=0.5/\sqrt{3},\ y^*=x^*-1,\ z^*=x^*$ в пространстве с постоянной скоростью 0.5 м/с = const, показаны на рис. 4. На этих же рисунках, помимо смещений ПА, показана также евклидова норма $\|\varepsilon(t)\|$ вектора динамической ошибки отслеживания РО ПМ программной точки, движущейся в СК XYZ с заданной скоростью по указанной выше пространственной траектории. При этом на рис. 4а показаны $\|\varepsilon(t)\|$ и отклонения ПА при использовании только замкнутой автоматической системы стабилизации ПА, на рис. 4б – движения с использованием только его разомкнутой системы стабилизации с точно рассчитываемыми параметрами, а на рис. 4в и 4г – движения ПА с использованием разработанной комбинированной системы стабилизации.

Следует отметить, что без использования систем стабилизации ПА в процессе работы ПМ он опрокидывается, и выполнение манипуляционных операций становится вообще невозможным. Из рис. 4в и 4г видно, что синтезированная комбинированная система стабилизации ПА позволяет добиться его точного удержания, достаточного для выполнения манипуляционных операций.

Кроме того, результаты моделирования показали, что при стабилизации ПА с помощью разомкнутой системы в процессе движения ПМ по указанной выше прямолинейной траектории с той же скоростью и погрешностях расчета силовых и моментных воздействий ПМ на ПА, не превышающих 10%, величина $\|\varepsilon(t)\|$ увеличивается на 35%. При использовании комбинированной системы стабилизации ПА, тех же законах движения ПМ и 10% погрешностях вычисления его силовых и

моментных воздействий на ПА величина $\|\varepsilon(t)\|$ возрастает на 17%. Это подтверждает необходимость обязательного использования именно комбинированной системы стабилизации ПА.

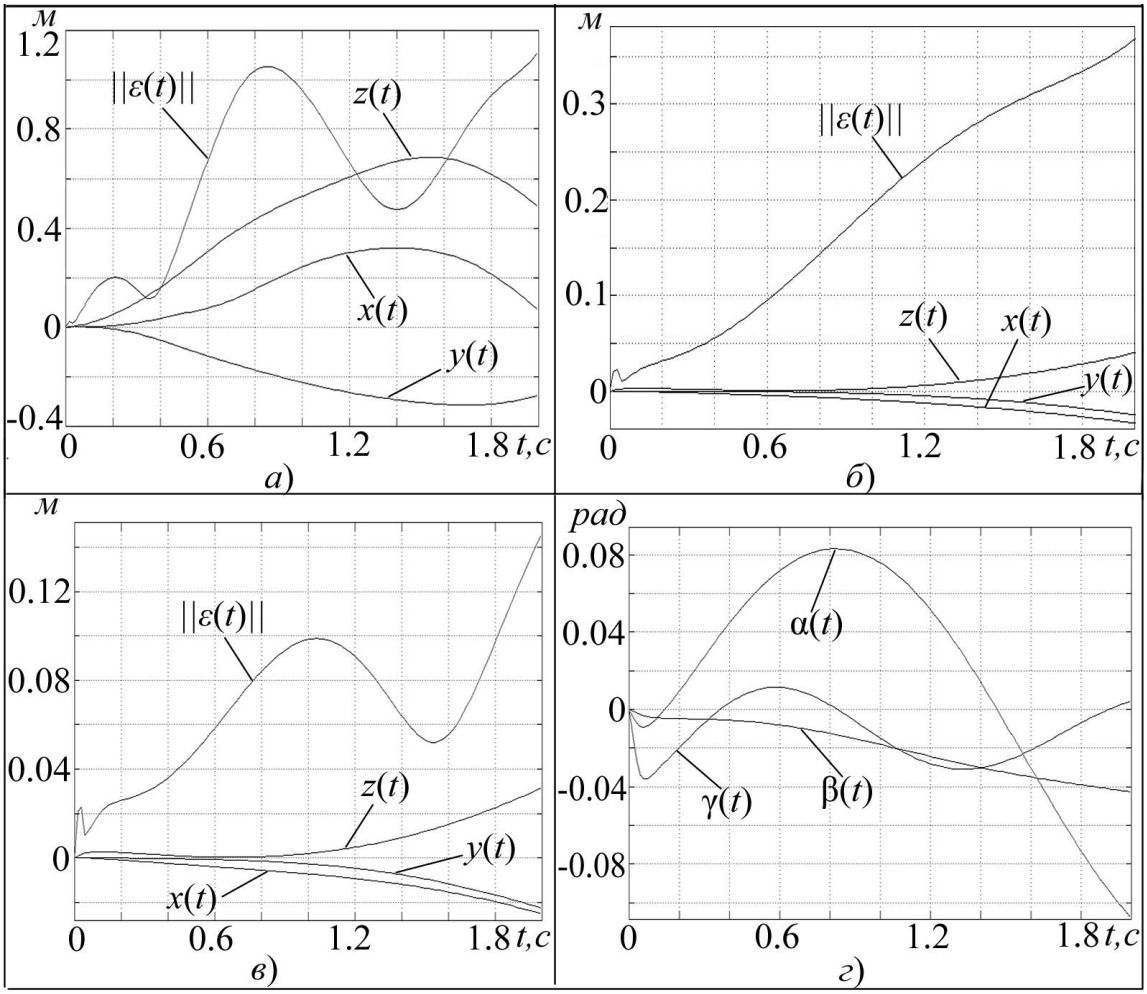

Рис. 4. Результаты моделирования работы синтезированной системы стабилизации при движении ПМ по пространственной траектории

В четвертой главе разработан метод синтеза системы автоматической коррекции программных траекторий движения РО ПМ, установленного на ПА. Принцип работы указанной системы проиллюстрирован на рис. 5. На этом рисунке введены следующие обозначения: *1* - ПА в исходном положении; *2* – исходное положение ПМ, РО которого находится на заданной пространственной траектории *3*; *4* - ПА в положении, смещенном относительно исходного; *5* - новое положение ПМ, обеспечивающее точное прохождение его РО по заданной траектории *3*. В исходном положении *1* с центром масс *C* ПА, совпадающем с центром его величины, совмещены начала СК XYZ и $X_cY_cZ_c$, оси которых в этом положении ПА совпадают.

Вектор $P_c(t) = [\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T \in R^3$ задает смещение точки *C* в СК XYZ, а вектор $P_c^*(t) \in R^3$ - текущее желаемое положение характерной точки рабочего органа ПМ в СК $X_cY_cZ_c$, в которой он работает, и рассчитывается по формуле

$$P_c^*(t) = R^T(P^*(t) - P_c(t)), \qquad (2)$$

где $R = \begin{bmatrix} C\beta C\gamma - S\alpha S\beta S\gamma & -S\beta C\alpha & S\gamma C\beta + S\alpha S\beta C\gamma \\ S\beta C\gamma + S\alpha S\gamma C\beta & C\alpha C\beta & S\beta S\gamma - S\alpha C\beta C\gamma \\ -S\gamma C\alpha & S\alpha & C\alpha C\gamma \end{bmatrix}$ - матрица поворотов СК $X_cY_cZ_c$ относительно СК XYZ, $S\alpha = \sin\alpha$; $S\beta = \sin\beta$; $C\alpha = \cos\alpha$; $C\beta = \cos\beta$; $C\gamma = \cos\gamma$. Подстановка матрицы R в выражение (2) позволяет найти элементы вектора

$$P_c^*(t) = \begin{bmatrix} (C\beta C\gamma - S\alpha S\beta S\gamma)(x^* - \Delta x) + (S\beta C\gamma + S\alpha S\gamma C\beta)(y^* - \Delta y) - S\gamma C\alpha(z^* - \Delta z) \\ -S\beta C\alpha(x^* - \Delta x) + C\alpha C\beta(y^* - \Delta y) + S\alpha(z^* - \Delta z) \\ (S\gamma C\beta + S\alpha S\beta C\gamma)(x^* - \Delta x) + (S\beta S\gamma - S\alpha C\beta C\gamma)(y^* - \Delta y) + C\alpha C\gamma(z^* - \Delta z) \end{bmatrix}.$$

Очевидно, что при использовании непрерывно рассчитываемого вектора $P_c^*(t)$ в СУ ПМ его РО будет перемещаться по заданной пространственной траектории *3* даже в условиях незапланированных смещений ПА от исходного положения *1*.

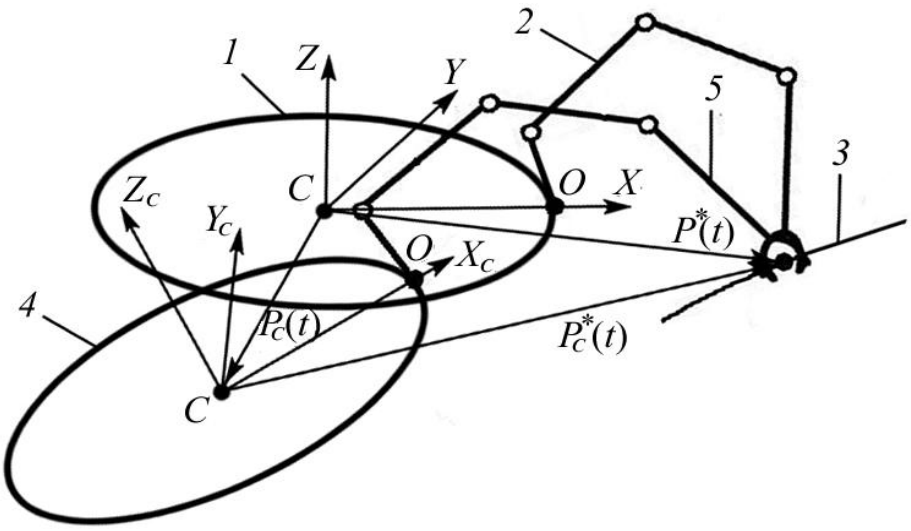

Рис. 5. ПА и схема расположения СК

В этой же главе разработан метод синтеза системы управления режимом движения РО ПМ, обеспечивающей максимально возможную скорость перемещения этого органа вдоль сложных пространственных траекторий, гарантируя выполнение неравенства:

$$\varepsilon_n(t) \le \varepsilon_{n\max}, \qquad (3)$$

где $\varepsilon_n(t) \in R^3$ - вектор отклонения РО от заданной траектории его движения; $\varepsilon_{n\max}$ - максимально допустимое отклонение этого органа от заданной траектории.

Обобщенная схема синтезированной на основе предложенного метода системы, которая применима как для подводных, так и для промышленных манипуляторов, представленная на рис. 6.

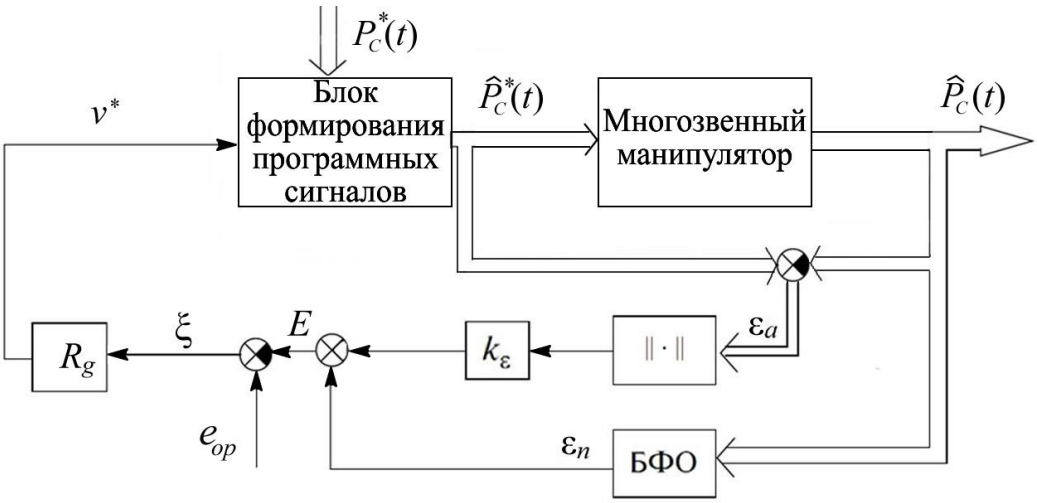

Рис. 6. Структурная схема системы автоматического управления режимом движения РО манипулятора

На этой схеме введены следующие обозначения: $v^*(t)$ - модуль вектора желаемой скорости движения РО вдоль заданной траектории; R_g – регулятор желаемой величины $v^*(t)$; БФО – блок формирования отклонения РО от заданной траектории; e_{op}=const $(e_{op} \le \varepsilon_{n\max})$ - величина, обеспечивающая выполнение условия (3); $\varepsilon_a(t)$ - вектор отклонения РО от программной точки, перемещающейся по заданной траектории; $\hat{P}_C^*(t)$ и $\hat{P}_C(t)$ - векторы желаемого и реального положения РО в СК $X_cY_cZ_c$, соответственно.

Динамическая точность движения РО ПМ оценивается с помощью комплексной величины $E(t)$, которая вычисляется по формуле:

$$E(t) = k_\varepsilon \varepsilon_m(t) + \varepsilon_n(t), \tag{4}$$

где $\varepsilon_m(t)$ – евклидова норма вектора динамической ошибки слежения РО в СК $X_cY_cZ_c$; k_ε = const – положительный коэффициент, определяемый с помощью выражения $k_\varepsilon = e_{on} / \varepsilon_m^{доп}$, где $\varepsilon_m^{доп}$= const – допустимое значение $\varepsilon_m(t)$. Первое слагаемое выражения (4) ограничивает величину $v^*(t)$ при движении РО точно по заданной траектории, но с некоторым запаздыванием относительно программной точки, перемещающейся по этой траектории, а второе слагаемое ограничивает $v^*(t)$ с учетом текущего значения $\varepsilon_n(t)$.

Неизменяемая часть системы, являющаяся объектом управления для регулятора R_g, описывается передаточной функцией

$$W(s) = E(s)/v^*(s) = 3\tilde{k}_{FD}\tilde{k}_m\tilde{k}_e\left(\sum_{i=1}^{n}|\tilde{k}_{vi}|\right)\frac{\Phi_{\varepsilon m}(s)}{s},$$

где $\Phi_{\varepsilon m}(s)$ - передаточная функция по ошибке, описывающая динамику i-го привода степени подвижности m манипулятора, замкнутого единичной отрицательной обратной связью, работающего в самых неблагоприятных условиях эксплуатации; $\tilde{k}_{FD}, \tilde{k}_m, \tilde{k}_e, \tilde{k}_{vi}$ $(i = \overline{1,n})$ - переменные коэффициенты, значения которых выбираются такими, чтобы регулятор R_g, синтезированный для этих значений, работал с заданным качеством для всех возможных их вариаций.

Результаты моделирования синтезированной системы (см. рис. 6) полностью подтвердили эффективность ее работы при выборе режимов перемещения РО манипуляторов с заданной динамической точностью по произвольным пространственным траекториям.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработан и исследован метод синтеза высокоточной комбинированной автоматической системы стабилизации ПА в заданной точке пространства при работающем в вязкой среде ПМ.

2. Разработан рекуррентный алгоритм решения ОЗД для ПМ, перемещающегося с высокой скоростью в водной среде, который позволяет более точно учесть особенности взаимодействия звеньев этого ПМ с водной средой.

3. Разработан метод синтеза системы автоматической коррекции программных траекторий движения РО ПМ, установленного на ПА. Предложенная система позволяет с высокой точностью выполнять манипуляционные операции в режиме зависания ПА вблизи объекта работ при его незначительных смещениях от исходного положения.

4. Разработан метод синтеза системы автоматического управления режимом движения РО ПМ, обеспечивающей максимально возможную скорость перемещения этого органа по произвольным пространственным траекториям при сохранении заданной динамической точности управления.

5. Предложен и апробирован подход к экспериментальному определению коэффициентов вязкого трения, возникающих при поступательных перемещениях звеньев ПМ в водной среде, а также зависимостей этих коэффициентов от текущих углов наклона звеньев ПМ к набегающему потоку жидкости.

6. На основе предложенных методов синтезированы и исследованы работы различных систем управления в условиях эксплуатации, приближенных к реальным. Результаты выполненных исследований полностью подтвердили их эффективность по сравнению с существующими системами.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Коноплин А.Ю. Метод синтеза системы автоматического управления режимом движения схвата манипулятора по сложным

пространственным траекториям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. №6. С. 47-54.

2. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической коррекции программной траектории движения многозвенного манипулятора, установленного на подводном аппарате // Мехатроника, автоматизация, управление, 2013. № 1. С. 40-45.

3. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. №6. С. 53-56.

4. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 2 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. №7. С. 29-34.

5. Патент РФ на изобретение № 2462745. Система коррекции траектории движения манипулятора // В.Ф.Филаретов, А.Ю. Коноплин. Бюл. № 27. 2012.

6. Патент РФ на изобретение РФ № 2475799. Способ управления подводным манипулятором в режиме зависания подводного аппарата // В.Ф.Филаретов, А.Ю. Коноплин патент. Бюл. № 5. 2013.

7. Патент РФ на изобретение № 2487008. Электропривод манипулятора // В.Ф.Филаретов, А.Ю. Коноплин патент. Бюл. № 19. 2013.

8. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Коноплин А.Ю. Синтез системы автоматического формирования программных сигналов движения многозвенного манипулятора // Материалы 7-й научно-технической конференции "Мехатроника, автоматизация, управление". Санкт-Петербург, 2010. С. 404-407.

9. Коноплин А.Ю. Метод синтеза системы автоматического управления режимом движения схвата манипулятора по сложным пространственным траекториям // Сборник работ победителей отборочного тура Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов, аспирантов и молодых ученых по нескольким междисциплинарным направлениям / Мин-во образования и науки РФ, Юж.-Рос. гос. техн. ун-т.(НПИ). - Новочеркасск: Лик, 2011. С. 186-188.

10. Коноплин А.Ю. Система автоматической коррекции программной траектории движения многозвенного манипулятора, установленного на подводном аппарате // Сборник трудов 4-ой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». Москва, 2011. С. 257-259.

11. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической коррекции программной траектории движения многозвенного манипулятора, установленного на подводном аппарате // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». Санкт-Петербург, 2012. С. 295-302.

12. Гетьман А.В., Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Силы и моменты, действующие на манипулятор подводного аппарата в морской среде. Материалы 10-й международной научно-практической конференции «Проблемы транспорта Дальнего востока». Владивосток, 2013. С. 9-11.

13. Гетьман А.В., Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Итоги аэродинамических исследований сопротивления звена манипулятора подводного аппарата. Материалы

10-й международной научно-практической конференции «Проблемы транспорта Дальнего востока». Владивосток, 2013. С. 17-21.

14. Гетьман А.В., Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Экспериментальный метод измерения сопротивления звена манипулятора подводного аппарата // Материалы 56-й Всероссийской научной конференции. Том III. Фундаментальные и прикладные вопросы естествознания. -Владивосток: Филиал ВУНЦ ВМФ "ВМА им. Н.Г.Кузнецова", 2013. С. 52-59.

15. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем манипуляторе. Труды XII Всерос. совещ. по проблемам управления. Москва, 2014. С. 3570-3382.

16. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Гетьман А.В. Экспериментальное определение коэффициента вязкого трения для расчета силового воздействия на перемещающееся звено подводного манипулятора // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». Санкт-Петербург, 2014. С. 219-223.

17. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Метод синтеза системы многоуровневой автоматической стабилизации подводного аппарата в водной среде в процессе выполнения манипуляционных операций // Материалы 7-й Российской мультиконференции по проблемам управления (РМКПУ-2014). Санкт-Петербург, 2014. С. 198-208.

18. Filaretov V.F., Yukhimets D.A., Konoplin A.Yu. Synthesis of System for Automatic Formation of Multilink Manipulator Velocity// The Second RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM 2014). Tehran IRAN. 15-17 October 2014, CD-ROM.

19. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu., Konoplin N.Yu. Method of Synthesis of Automatic Correction Systems of Underwater Vehicles Linear Displacements // 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. Vienna. 26-26 November 2014, CD-ROM.

20. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu. System of Automatically Correction of Program Trajectory of Motion of Multilink Manipulator Installed on Underwater Vehicle // 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. Vienna. 26-26 November 2014, CD-ROM.

Личный вклад автора. Все основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно. В работах [1-20] руководителем поставлены задачи, а соискателем получены основные научные результаты. В работах [1, 2, 5, 7-10, 18, 20] автором разработаны системы автоматического формирования программных сигналов управления многозвенными манипуляторами, установленными на ПА. В работах [3, 4, 6, 15, 17, 19] разработаны системы автоматического управления и стабилизации ПА в заданной точке пространства. В работах [12-14, 16] разработан метод экспериментального определения коэффициентов вязкого трения, возникающих при движении звеньев ПМ.

Коноплин Александр Юрьевич

Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе

Автореферат

Подписано к печати Усл. п. л. 1.0. Уч.-изд. л. 0.84
Формат 60×84/16. Тираж 100. Заказ .

Издано ИАПУ ДВО РАН. г. Владивосток, Радио, 5.
Отпечатано участком оперативной печати ИАПУ ДВО РАН.
г. Владивосток, Радио, 5.