

Научная статья

УДК 629.565.1

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-1/14-26>

Математическая модель динамики полупогружного плавучего крана при позиционировании на точке проведения работ

Михаил Георгиевич Балашов¹, Александр Борисович Ваганов², Юрий Федорович Орлов², Алексей Юрьевич Панов², Владимир Николаевич Савинов², Екатерина Васильевна Маштакова²✉

¹ Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

² Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексея, Нижний Новгород, Россия

✉ mashtakova45@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрена проблема математического моделирования динамики полупогружного плавучего крана при позиционировании в местах проведения работ. Описываются принципы построения математической модели, входные и определяемые параметры, а также влияние на динамику крана внешних сил, таких как ветер, течение и волнение. Рассматривается использование математической модели динамики подводно-подъемного устройства (ППБУ) для моделирования движения крана, а также представлена функциональная блок-схема программы DYNAMIC-ППБУ для анализа динамики судна в различных условиях шторма.

Ключевые слова: математическая модель, корпус, момент, движение корпуса, динамика, полупогружной плавучий кран, дифференциальные уравнения, грузоподъемные устройства, система позиционирования

Для цитирования: Балашов М.Г., Ваганов А.Б., Орлов Ю.Ф., Панов А.Ю., Савинов В.Н., Маштакова Е.В. Математическая модель динамики полупогружного плавучего крана при позиционировании на точке проведения работ // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 1(58). С. 14–26.

Original article

Mathematical model of dynamics semi-submersible floating crane when positioning at the point of work

Mikhail G. Balashov¹, Alexander B. Vaganov², Yuri F. Orlov², Alexey Yu. Panov², Vladimir N. Savinov², Ekaterina V. Mashtakova²✉

¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

² Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

✉ mashtakova45@yandex.ru

Abstract. This article discusses the problem of mathematical modeling of the dynamics of a semi-submersible floating crane when positioning in work sites. The principles of constructing a mathematical model, input and determinable parameters, as well as the influence of external forces such as wind, current and waves on the dynamics of the crane are described. The use of a mathematical model of the dynamics of an underwater lifting device for modeling the movement of a crane is considered, and a functional block diagram of the DYNAMIC-PPBU program for analyzing the dynamics of a vessel in various storm conditions is presented.

Keywords: mathematical model, hull, moment, hull movement, dynamics, semi-submersible floating crane, differential equations, lifting devices, positioning system

For citation: Balashov M.G., Vaganov A.B., Orlov Yu.F., Panov A.Yu., Savinov V.N., Mashtakova E.V. Mathematical model of dynamics of a semi-submersible floating crane when positioning at the point of work. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 1(58), pp. 14–26. (In Russ.).

Введение

Математическая модель динамики полупогружного плавучего крана (ППК) при его позиционировании на точке проведения работ является ключевым аспектом для решения ряда задач, включая определение параметров движения судна, выбор и проверку алгоритмов управления системой позиционирования (СП) и совместную работу с якорными средствами удержания. Модель может быть применена при обустройстве и строительстве буровых платформ и глубоководных оснований. Множество математических моделей, разработанных для подобных морских средств освоения морских месторождений, указывают на необходимость использования системного подхода к разработке моделей, что позволяет выполнять модернизацию и замену модулей, а также открытый доступ к программному обеспечению.

Общие принципы математического моделирования

Базовая математическая модель ППК предназначена:

- 1) для определения параметров движения с учётом инерционных характеристик судна в зависимости от изменения волнения, ветра и течения;
- 2) для управления СП в момент удержания при совместной работе с якорными средствами над точкой проведения работ.

На рис. 1 и 2 показаны ППК, выполняющие монтажные работы. Известны математические модели, близкие по назначению [1–6].



Рис. 1. Плавучий кран DB-101

Fig. 1. Floating crane DB-101



Рис. 2. Проект KS5000 ЦБ «Коралл»

Fig. 2. The KS5000 project of the Central Design Bureau "Coral"

Разработанные А.Б. Вагановым и И.Д. Краснокутским [5, 7–9] математические модели динамики ППБУ максимально соответствуют целям исследования из-за системного характера, допускающего модернизацию и замену модулей.

Входными характеристиками при математическом моделировании позиционирования должны являться:

- а) глубина моря;
- б) для волнения – амплитуда, частота, направление;
- в) для течения – скорость и направление;
- г) для ветра – скорость и направление;
- д) для якорных связей – натяжение, длина травления;
- е) для ВРК – угол поворота, создаваемый упор;
- ж) для ПУ – создаваемый упор и момент.

Параметры, которые должны быть определены с помощью математической модели:

- а) продольное перемещение;

- б) поперечное перемещение;
- в) вертикальное перемещение;
- г) угол крена;
- д) угол дифферента;
- е) угол курса;
- ж) курсовые углы внешнего силового воздействия и направления;
- з) горизонтальное смещение;
- и) параметры движения подвешенного груза.

Функционально компоновка ППБУ показана на рис. 3. Математическая модель динамики судна как при движении в окрестности точки работы, так и при его позиционировании при ветре, волнении и течении реализована в программе DYNAMIC-ППБУ.

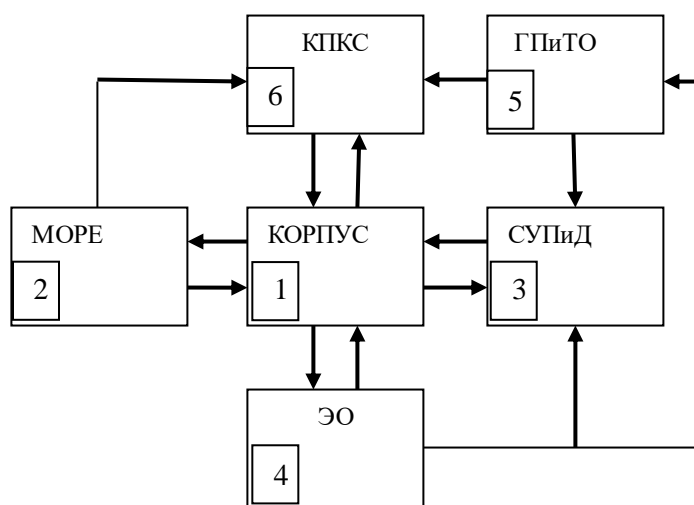


Рис. 3. DYNAMIC-ППБУ – функциональная блок-схема
 Fig. 3. DYNAMIC-PPB – functional block diagram

На корпус ППБУ в штормовых условиях моря действуют внешние силы различной природы. Движение корпуса ППБУ представляет результат их суммарного действия. Сгруппированы эти силы в принятом в математической модели порядке.

1. Силы тяжести и силы плавучести \vec{R}_1, \vec{M}_1 .
2. Инерционно-демпфирующие гидродинамические силы \vec{R}_2, \vec{M}_2 .
3. Возмущающие силы от волн гидродинамической природы \vec{R}_3, \vec{M}_3 .
4. Гидродинамические силы, обусловленные течением g .
5. Аэродинамические силы от ветра \vec{R}_5, \vec{M}_5 .
6. Реакции пассивных якорных средств позиционирования \vec{R}_6, \vec{M}_6 .
7. Гидродинамические силы движителей активных средств динамического позиционирования \vec{R}_7, \vec{M}_7 .
8. Реакция комплекса ходовых средств управления \vec{R}_8, \vec{M}_8 .
9. Реакция комплекса ходовых движителей \vec{R}_9, \vec{M}_9 .
10. Реакция комплекса грузоподъемных и вспомогательных технологических устройств $\vec{R}_{10}, \vec{M}_{10}$.

Такие характеристики действующей внешней системы сил, как главный вектор \vec{N} и главный момент \vec{M} , определяются в виде векторной суммы сил разных категорий. Определяющая роль принадлежит гидродинамическим, аэродинамическим силам, реакциям системы позиционирования и воздействию перемещаемых и принимаемых грузов.

Осуществим декомпозицию системы ППК на уровне, который примем как первый. Функциональное описание системы на этом уровне выполнено по схеме (см. рис. 3), где показаны наиболее сильные связи между подсистемами.

Подсистема 1 – КОРПУС, функциональное назначение: обеспечение плавучести, устойчивости, непотопляемости, качки и позиционирования на точке работы. Корпус является носителем энергетического, бурового и технологического оборудования, технологических запасов, балласта, жилого блока экипажа и блоков управления объекта. Корпус является центральной подсистемой.

Подсистема 2 – МОРЕ, это внешняя среда, представленная в качестве подсистемы. Её описание необходимо для определения аэрогидродинамических сил воздействия моря на корпус и другие подсистемы.

Подсистема 3 – СУПиД: средства управления горизонтальной позицией и движением корпуса ППК. Функциональное назначение: стабилизация положения корпуса плавательного средства в заданной позиции относительно бурового основания, а также возможность выполнять произвольное изменение этой позиции.

Подсистема 4 – ЭО: энергетическое оборудование. Функциональное назначение: обеспечение энергией, необходимой для работы других подсистем.

Подсистема 5 – ГПиТО: грузоподъемное и технологическое оборудование. Функциональное назначение: выполнение процедуры подъема и монтажа. Эта подсистема определяет назначение плавательного средства, определяя его функционал. ГПиТО накладывает значимые ограничения на основные характеристики движения корпуса плавательного средства под воздействием моря.

Подсистема 6 – КПКС: комплекс противокреновых средств и вспомогательного оборудования. Функциональное назначение – задавать начальную посадку корпуса перед выполнением грузовой операции, а также компенсировать крен и дифферент ППК при перемещении груза. Эта подсистема накладывает ограничения на характеристики вертикальных движений корпуса, представлена балластными отсеками, насосами подачи жидкого груза в отсеки и локальной системой управления.

Позиционирование с помощью якорной системы подруливающих устройств и главных движителей.

Опыт проектирования ППБУ, БС и ППК как в нашей стране, так и за рубежом позволяет сформулировать следующие технические условия для создания высокоэффективных судов:

- судно должно быть высококомобильным, чтобы свести к минимуму потери времени при переходах на точку работы;

- внешние нагрузки на судно, создаваемые ветром, волнением, течением, должны компенсироваться противодействием средств позиционирования (якорных связей и подруливающих устройств), которые должны иметь возможность создавать суммарный угол в разных направлениях;

- ППК должен сохранять свою позицию при заданных скорости ветра, скорости течения, определенных параметрах волн;

- перемещения корпуса не должны превышать допустимых значений для обеспечения работоспособности кранового и технологического оборудования.

Выполним классификацию расчетных ситуаций. Укажем два вида движения ППК на точке работы.

1. Удержание ППК – это сохранение горизонтальной позиции относительно точки работы. В направлении «удержание ППК» определяющими являются постоянные составляющие

сил от ветра, течения, волнения. Они определяют статическое положение равновесия, относительно которого происходят динамические отклонения, обусловленные действием волн и пульсаций скорости ветра (качка). Для определения кинематики корпуса при качке применяются дифференциальные уравнения движения судна.

2. **Позиционирование ППК** – это изменение горизонтальной позиции. Дополнительно к внешним силам учитываются гидродинамические силы на корпусе, обусловленные движением корпуса (силы инерции, силы вязкостной природы). Это вызывает необходимость определенного запаса мощности двигателей СП.

Характерные движения корпуса ППК:

- а) вращение на месте при одновременном действии внешней нагрузки;
- б) продольное перемещение;
- в) поперечное перемещение корпуса;
- г) перемещение в произвольном направлении;
- д) перемещение в произвольном направлении с одновременным поворотом и занятием определенной позиции;
- е) режим свободного хода.

Задача решается при помощи математической модели, имитирующей действие внешней нагрузки, работу системы управления СП, динамику движения корпуса и двигателей с помощью системы дифференциальных уравнений. Критериями эффективности СП являются выполнимость данных маневров и неперевышение эксплуатационных характеристик системы.

Действие системы автоматического управления средствами ДП (двигателями) на данном этапе должно иметь простой алгоритм, доступный для анализа оператору.

В этом направлении исследования главными являются относительно медленные движения корпуса в горизонтальной плоскости под действием СП, происходящие на фоне действия ветра, течения и волн. Поэтому разделим движения корпуса ППК на две составляющие: медленные, обусловленные действием СП и ветром, и быстрые, обусловленные качкой.

Каждая система уравнений интегрируется отдельно в такте каскадного интегрирования. По окончании такта скорости медленных и быстрых движений складываются, и уже затем осуществляется интегрирование уравнений для получения траектории движения корпуса и углов наклона.

Для режима свободного хода задача также решается при помощи математической модели, имитирующей действие внешней нагрузки, динамику движения корпуса и двигателей с помощью системы дифференциальных уравнений управляемости судов.

3. **Позиционирование совместно с выполнением грузовой операции** – это изменение позиции с грузом на гаке.

Характеристики средств горизонтального позиционирования:

- элементы якорной системы позиционирования (тип, длина и количество якорных связей, натяжения, динамические характеристики якорных лебёдок, возможность их работы в активном режиме);
- подруливающие устройства (тип, количество и расположение, гидродинамические характеристики, динамические характеристики привода, возможность работы в активном режиме);
- главные двигатели (тип, количество и расположение, гидродинамические характеристики, динамические характеристики привода, возможность работы в активном режиме);
- влияние ледового режима на эксплуатационные характеристики средств позиционирования.

Математическая модель и методы ее реализации на ЭВМ

Для определения параметров посадки при движении корабля применим следующие системы координат:

1) $O\xi, \eta, \zeta$ – неподвижная система координат. Начало системы координат располагается над спокойной поверхностью воды в выбранной точке. Оси $O\xi$ и $O\eta$ горизонтальны, а ось $O\zeta$ вертикальна;

2) $O_2\xi_2, \eta_2, \zeta_2$ – система неподвижных гидромеханических координат. Начало отсчета данной системы координат находится на поверхности воды и на одной вертикали с началом системы неподвижных координат, а оси $O\xi \parallel O_2\xi_2, O\eta \parallel O_2\eta_2, O\zeta \parallel O_2\zeta_2$.

3) Gx, y, z – связанная с корпусом плавательного средства динамическая система координат, предназначенная для составления уравнений движения корпуса и нахождения внешних сил;

4) $G\xi_1, \eta_1, \zeta_1$ – первая полусвязанная координатная система с началом отсчета, совпадающим с началом связанной системы координат, а оси $G\xi_1 \parallel O\xi, G\eta_1 \parallel O\eta, G\zeta_1 \parallel O\zeta$.

Из многообразия систем Эйлеровых углов для определения характеристик движения в кораблестроении применяется система, образуемая тремя поворотами вокруг осей трех разных номеров, выполняемых последовательно: χ – курс, ψ – дифферент, θ – крен. Положительные направления углов поворота – по часовой стрелке.

Положим, что в начальный момент времени корпус находится в состоянии равновесия на тихой воде и три системы координат ориентированы, как показано на рис. 4. Принятие данных систем координат обусловлено стремлением к единообразию с частными системами координат, применяемыми для описания других подсистем, и упрощения в связи с этим формул перехода между системами координат.

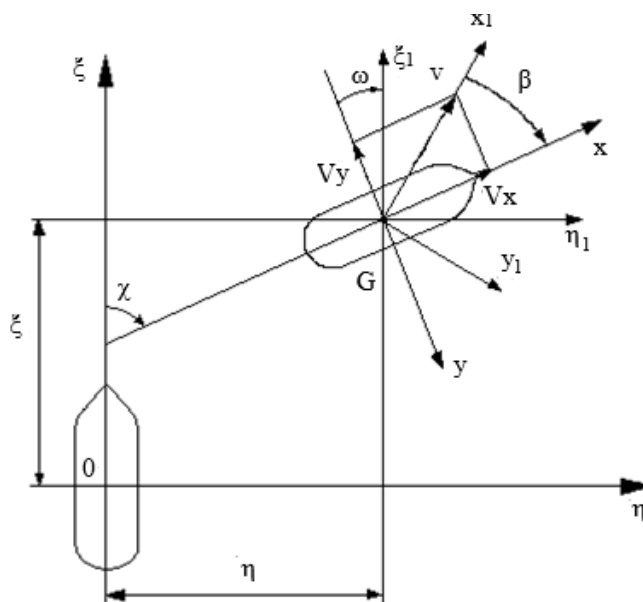


Рис. 4. Направление осей систем координат
 Fig. 4. Direction of axes of coordinate systems

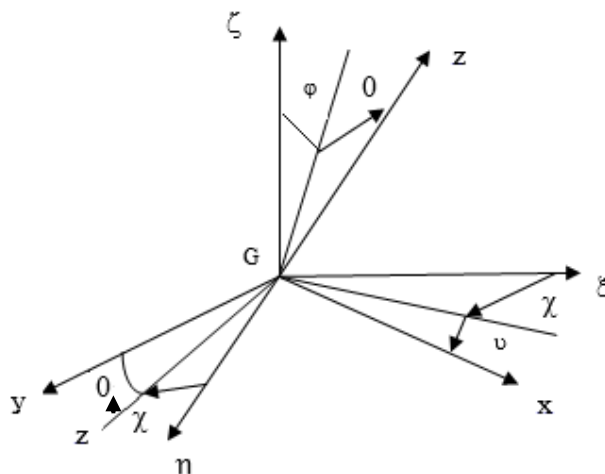


Рис. 5. Эйлеровы углы наклонов корпуса
 Fig. 5. Eulerian angles of inclination of the body

Корпус и окружающая его вода образуют гидромеханическую систему, взаимодействие между элементами которой проявляется в возникновении гидродинамических сил инерционной и неинерционной природы. Гидродинамические силы инерционной природы (их главные части), как это традиционно делается в теории управляемости корабля, объединим с силами инерции корпуса для получения компактной и удобной для решения системы уравнений движения.

Аналитическая механика базируется на уравнениях Лагранжа второго рода движения механической голономной системы, обладающей n степенями свободы [10, 11]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} = N_i, i = 1, 2, 3, \dots, n, \tag{1}$$

в которых: T – кинетическая энергия системы; q_i – обобщенная координата; \dot{q}_i – обобщенная скорость; N_i – обобщенная сила. Для твердого недеформируемого тела $\partial T / \partial q_i = 0$.

В декартовой системе координат $\partial T / \partial \dot{q}_i$ представляют проекции вектора количества движения \bar{Q} для поступательного движения вдоль осей и проекции вектора момента количества движения \bar{K} для вращательного движения вокруг соответствующих осей:

$$\frac{\partial T}{\partial v_v} = Q_v; \quad \frac{\partial T}{\partial \Omega_v} = K_v, v = 1, 2, 3, \tag{2}$$

где v_v и Ω_v – обобщенная скорость и мгновенная угловая скорость.

Обобщенные силы N_i , действующие на корпус, в большинстве случаев удобнее определять в связанной системе координат. Поэтому уравнения движения корпуса также целесообразно представлять в той же системе координат. Основываясь на методе относительного движения, уравнения (1) в проекциях на оси связанной системы координат в векторной форме приводятся к виду [10]:

$$\frac{d\bar{Q}}{dt} + [\bar{\Omega} \times \bar{Q}] = \bar{N}; \tag{3}$$

$$\frac{d\bar{K}}{dt} + [\bar{\Omega} \times \bar{K}] + [\bar{V} \times \bar{Q}] = \bar{M},$$

где \bar{N} – главный вектор внешних сил, а \bar{M} – главный момент внешних сил неинерционной природы.

Для определения Q_v и K_v необходимо иметь выражение для кинетической энергии T структуры корпус–жидкость. Для определения T , равной сумме кинетических энергий корпуса и жидкости, в гидромеханике применяется известное выражение:

$$T = 0.5 \sum_{i=1}^6 \sum_{k=1}^6 (m_{ik} + \lambda_{ik}) v_i v_k \tag{4}$$

Собственная инерция корпуса характеризуется матрицей $\{ m_{ik} \}$:

$$\{ m_{ik} \} = \begin{pmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{xx} & -J_{xy} & -J_{xz} \\ 0 & 0 & 0 & -J_{yx} & J_{yy} & -J_{yz} \\ 0 & 0 & 0 & -J_{zx} & -J_{zy} & J_{zz} \end{pmatrix}, \tag{5}$$

в которой: m – масса корпуса; J_{xx}, J_{yy}, J_{zz} – моменты инерции массы корпуса; J_{xy}, J_{xz}, J_{yz} – центробежные моменты инерции массы корпуса.

Присоединенная инерция воды характеризуется матрицей $\{\lambda_{ik}\}$. Тогда совокупная инерция структуры корпус–жидкость будет определяться матрицей $\{m_{ik} + \lambda_{ik}\}$:

$$\begin{pmatrix} m + \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & \lambda_{14} & \lambda_{15} & \lambda_{16} \\ \lambda_{21} & m + \lambda_{22} & \lambda_{23} & \lambda_{24} & \lambda_{25} & \lambda_{26} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & m + \lambda_{33} & \lambda_{34} & \lambda_{35} & \lambda_{36} \\ \lambda_{41} & \lambda_{42} & \lambda_{43} & J_{XX} + \lambda_{44} & -J_{XY} & -J_{XZ} \\ \lambda_{51} & \lambda_{52} & \lambda_{53} & -J_{YX} - \lambda_{54} & J_{YY} + \lambda_{55} & -J_{YZ} - \lambda_{56} \\ \lambda_{61} & \lambda_{62} & \lambda_{63} & -J_{ZX} - \lambda_{64} & -J_{ZY} - \lambda_{65} & J_{ZZ} + \lambda_{66} \end{pmatrix} \quad (6)$$

Выражая компоненты векторов \bar{Q} и \bar{K} через кинетическую энергию T , приходим к системе скалярных уравнений [12]:

$$\begin{aligned} \frac{dv_i}{dt} &= \frac{1}{(m_{ii} + \lambda_{ii})} [N_i - C_i - \varepsilon_{ijk} \Omega_j Q_k] \quad (i, j, k, \quad v = 1, 2, 3) \\ \frac{d\Omega_v}{dt} &= \frac{1}{(m_{ii} + \lambda_{ii})} [M_v - C_i - \varepsilon_{vjk} \Omega_j K_k - \varepsilon_{vjk} v_j Q_k] \quad (i, j, k = 1, 2, 3; \quad i = v + 3) \end{aligned} \quad (7)$$

где ε – сдвиг фазы, C_i – восстанавливающие силы и моменты.

Поступательное движение корпуса плавательного средства описывают первые три уравнения, а следующие три уравнения описывают вращательное движение. Входящие в систему уравнений (7) величины Q_k, K_v, C_k определяются выражениями [7].

Так как главные силы инерции $(m_{ii} + \lambda_{ii}) \frac{dv_i}{dt}$ значительно больше остаточных сил C_i из-за симметричности корпуса относительно его диаметральной плоскости, то система (7) хорошо обусловлена. Система уравнений считается хорошо обусловленной, если малые изменения в коэффициентах матрицы или в правой части вызывают малые изменения в решении.

Во второй части системы дифференциальных уравнений движения корпуса выполним переход к неподвижной системе координат:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} &= \Omega_x + (\Omega_z \cos\theta + \Omega_y \sin\theta) \operatorname{tg}\psi; \\ \frac{d\psi}{dt} &= \Omega_y \cos\theta - \Omega_z \sin\theta; \\ \frac{d\chi}{dt} &= \frac{1}{\cos\psi} (\Omega_z \cos\theta + \Omega_y \sin\theta); \\ \frac{d\xi}{dt} &= \sum_{j=1}^3 v_j \cdot k_{1j}; \quad \frac{d\eta}{dt} = \sum_{j=1}^3 v_j \cdot k_{2j}; \quad \frac{d\zeta}{dt} = \sum_{j=1}^3 v_j \cdot k_{3j} \end{aligned} \quad (8)$$

где k_{1j}, k_{2j}, k_{3j} – направляющие косинусы.

Совокупность двенадцати смешанных по системам координат уравнений (7) и (8) представляют математическую модель подсистемы КОРПУС.

Поскольку система уравнений является нелинейной и конструктивно сложной, её интегрирование предполагается осуществлять численными методами, для которых нормальный вид системы уравнений является обязательным. В развернутом виде подобные системы дифференциальных уравнений движения корпуса плавательного средства приведены в ряде работ [6].

При анализе сложных систем часто не удается описать строгими математическими зависимостями весь процесс функционирования объекта в целом (как для обычного судна с помощью амплитудной и фазовой частотных характеристик – качку или с помощью ходовых характеристик – ходкость). Чаще оказывается возможным описать лишь отдельные элементы

и взаимодействие этих элементов при функционировании системы. Сложные системы отличаются большим количеством разнородных элементов и переплетающихся связей. Всеми этими признаками ППК обладает в полной мере. Поэтому решение задачи исследования движения такого объекта будет благополучным, если оно получено на основе полного учета всех подсистем и элементов, всестороннего изучения и достоверного представления объективных закономерностей, а также правильного выбора исходных данных и применения наилучших методов решения этой задачи.

Задачи гидродинамики судов характерны тем, что зачастую используются частные системы дифференциальных уравнений движения (уравнения ходкости, управляемости, качки корабля), различающиеся числом и формой записи входящих в эти уравнения членов. Кроме этого, существуют разные методы определения гидродинамических характеристик корпуса и движительно-рулевого комплекса (теоретические и экспериментальные). Поэтому процедура внесения изменений или другого варианта локального алгоритма в программу для судна и особенно для ППК как сложной системы заложена в структуре программы.

Отметим основные принципы построения программы динамики ППК.

1. Уравнения движения подсистем ППК записываются в наиболее полном и общем виде. Методы и способы решения этих уравнений также должны отвечать требованию общности. В этом случае изменения структуры программы будут минимальными.

2. В соответствии с методом структурного программирования данная программа подразделяется на отдельные блоки и модули в зависимости от их функционального назначения. Замена полуавтономного модуля или блока другим модулем приводит к незначительному изменению структуры программы.

3. Структура программы должна содержать определенную последовательность: программа – анализ результатов – управление объектом. В структуре должны быть явно представлены управляющие параметры подсистем (например, такие как травление – выборка якорной связи, как изменение режима работы движителей, как прием балласта и т. п.). Математическая модель и программа должны стратегически отображать ППК в качестве управляемого объекта.

Для большинства подсистем ППК судна уравнения движения можно представить в виде задач Коши для системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений. При использовании численных методов решения таких систем уравнений встает проблема выбора оптимального метода, обеспечивающего наиболее быстрое, с требуемой точностью приближенное решение. Анализ этой проблемы применительно к задачам управляемости корабля приведен в работе [12].

Сформируем укрупнённую блок-схему интегрирования системы дифференциальных уравнений численным методом (рис. 6).

Для решения дифференциальных и связанных с ними уравнений в программе, которая позволяла бы обеспечить для каждого уравнения как устойчивость решения, так и выбор оптимального шага численного интегрирования, возникает потребность разработки соответствующей структуры расчетной системы. Существующие рекомендации по выбору рационального шага численного интегрирования справедливы лишь для систем дифференциальных уравнений с близкими параметрами динамичности [12, 13].

Для решения этой задачи осуществлено многоуровневое разделение совокупности всех дифференциальных уравнений по признаку близости параметров каждого. В качестве таких параметров примем постоянные времени для апериодических форм движения и периоды или частоты для колебательных форм движений. На первый уровень поместим уравнения с наименьшим значением параметров динамичности. На последующие уровни поместим дифференциальные уравнения с более высокими значениями параметров динамичности, отличающимися от предыдущего уровня более чем в 2–4 раза.

Для ППК наименьшими значениями параметров динамичности обладают движения корпуса в плоскости горизонта. Поэтому дифференциальные уравнения, описывающие данные движения корпуса, помещены на первый уровень.



Рис. 6. Укрупненная блок-схема интегрирования системы дифференциальных уравнений
 Fig. 6. An enlarged block diagram of the integration of a system of differential equations

Дифференциальные уравнения качки корпуса и подвешенного на гаке груза, обусловленные воздействием волнения на море, помещены на второй уровень.

Дифференциальные уравнения движения механической части комплексов «двигатель – исполнительный механизм» помещены на третий уровень.

Дифференциальные уравнения электромеханической части электроприводов помещены на четвертый уровень.

Дифференциальные уравнения электродинамики электроприводов, устройств и систем управления соответствуют пятому уровню, однако это уже выходит за рамки исследования движения ППК в течение длительного промежутка времени, достаточного для получения статистических данных в условиях нерегулярного ветрового волнения.

Для дифференциальных уравнений на каждом уровне может быть принят шаг интегрирования, близкий к оптимальному шагу. Здесь для каждого уровня может быть выдержано оптимальное соотношение шага интегрирования и параметра динамичности уравнения. Величина шага интегрирования уменьшается с увеличением номера уровня.

Примем схему квантования времени при численном интегрировании сложной системы дифференциальных уравнений. Сопутствующие интегрированию вычислительные блоки и модули, которые оказываются зависящими от временного шага, могут быть размещены на уровне, оптимальном для данного модуля.

Такое многоуровневое размещение дифференциальных уравнений в итоге позволяет применить процедуру каскадного интегрирования системы всех уравнений движения ППК.

Заключение

По результатам исследования можно отметить, что опыт проектирования ППБУ, БС и ППК как в нашей стране, так и за рубежом дал возможность сформулировать ряд технических

условий для создания высокоэффективных судов. Важными факторами являются высокая мобильность судна, компенсация внешних нагрузок путем использования средств позиционирования, сохранение позиции ППК при действии различных факторов и ограничение перемещений корпуса для обеспечения работоспособности оборудования. Классификация расчетных ситуаций предлагает два основных движения ППК на точке работы в море.

Характерные движения корпуса ППК включают вращение на месте, продольное и поперечное перемещения, перемещение в произвольном направлении, а также свободный ход. Решение задачи происходит с использованием математической модели, которая имитирует внешние нагрузки, систему управления СП и динамику движения корпуса и движителей.

Важным аспектом в исследовании является простой алгоритм действия системы автоматического управления средствами ДП, доступный для анализа оператору. Главное в этом направлении исследования – рассмотрение медленных и быстрых движений корпуса ППК, вызванных СП и внешними факторами.

Результаты исследований предоставляют возможность оптимизации проектирования и повышения эффективности системы позиционирования и управления судном, включая выполнение грузовых операций в условиях безопасности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ачкинадзе А.Ш., Борисов Р.В. Некоторые вопросы обоснования выбора типа и мощности средств активного управления буровым судном с динамической системой позиционирования // Исследование морских гидротехнических сооружений для освоения шельфа: межвузовский сборник. Ленинград: Ленинградский политехнический институт, 1980. С. 114–120.
2. Большев А.С., Фролов С.А. Кусочно-линейные методы математического моделирования перемещений заякоренных сооружений под воздействием ветра, течения, волнения и льда // Труды первой международной конференции «Освоение шельфа арктических морей России». РАО-93. Санкт-Петербург, 1993. С. 316–320.
3. Борисов Р.В. Разработка методов расчета качки плавучих буровых установок при различных режимах эксплуатации: дис. ... д-ра техн. наук. Ленинград, 1990. 35 с.
4. Борисов Р.В., Молодожников А.Б. Расчет качки заякоренных буровых установок на регулярном и нерегулярном волнении // Технические средства освоения Мирового океана: труды Ленинградского кораблестроительного института. Ленинград, 1980. С. 22–27.
5. Ваганов А.Б., Краснокутский И.Д. Расчет качки судов и плавучих сооружений на морском волнении: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014612348.
6. Исследование качки полупогружной буровой установки: отчет по НИР. ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 1987. Вып. 31916. 23 с.
7. Ваганов А.Б., Краснокутский И.Д., Гуров П.В., Балашов М.Г., Несин Д.Ю. Моделирование динамики морских краново-монтажных судов при позиционировании // Транспортные системы. 2020. № 1(15). С. 29–40. https://doi.org/10.46960/62045_2020_1_29
8. Ваганов А.Б., Краснокутский И.Д. Численное моделирование характерных режимов эксплуатации водоизмещающего судна // Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве: сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции. Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2016. С. 35–41.
9. Краснокутский И.Д. Метод расчёта удержания ППБУ с комбинированной системой позиционирования в море: дис. ... канд. техн. наук. Горький, 1985. 348 с.
10. Басин А.М. Качка судов. Москва: Транспорт, 1969. 272 с.
11. Короткин А.И. Присоединенные массы судна: справочник. Ленинград: Судостроение, 1986. 312 с.
12. Калиткин Н.Н. Численные методы. Москва: Наука, 1978. 512 с.
13. Борисов Р.В., Молодожников А.Б. Составление систем уравнений качки полупогружных плавучих буровых установок на косом волнении // Надводные технические средства освоения Мирового океана: труды Ленинградского кораблестроительного института. Ленинград, 1978. С. 23–30.

REFERENCES

1. Achkinadze A.Sh., Borisov R.V. Some issues of substantiation of the choice of type and power of means of active control of a drilling vessel with a dynamic positioning system. *Research of marine hydraulic structures for the development of the shelf*. Leningrad, Leningradskij politehnicheskij institute Publ., 1980, pp.114–120. (In Russ.).
2. Bol'shev A.S., Frolov S.A. Piecewise linear methods of mathematical modeling of movements of anchored structures under the influence of wind, current, waves and ice. *Proceedings of the first international conference "Development of the shelf of the Arctic seas of Russia"*. RAO-93. Saint Peterburg, 1993, pp. 316–320. (In Russ.).
3. Borisov R.V. Development of methods for calculating the pitching of floating drilling rigs under various operating conditions. Doctor's degree thesis. Leningrad, LKI Publ., 1990. 35 p. (In Russ.).
4. Borisov R.V., Molodozhnikov A.B. Calculation of the pitching of anchored drilling rigs on regular and irregular waves. *Trudy LKI: Tehnicheskie sredstva osvoenija Mirovogo okeana*. Leningrad, 1980, pp. 22–27. (In Russ.).
5. Vaganov A.B., Krasnokutskij I.D. Calculation of pitching of ships and floating structures on sea waves: certificate of state registration of a computer program № 2014612348 (In Russ.).
6. Research on the pitching of a semi-submersible drilling rig: research report. CNII im. akad. A.N. Krylova Publ., 1987, iss. 31916, 23 p. (In Russ.).
7. Vaganov A.B., Krasnokutskij I.D., Gurov P.V., Balashov M.G., Nesin D.Ju. Modeling the dynamics of marine crane-mounting vessels during positioning. *Transportnye sistemy*, 2020, no. 1(15). pp. 29–40. (In Russ.). https://doi.org/10.46960/62045_2020_1_29
8. Vaganov A.B., Krasnokutskij I.D. Numerical modeling of characteristic operating modes of a displacement vessel. *Modern technologies in shipbuilding and aviation education, science and production: Proc. of conf.* NGTU im. R.E. Alekseeva Publ., 2016, pp. 35–41. (In Russ.).
9. Krasnokutskij I.D. A method for calculating the retention of a PBU with a combined positioning system at sea. Ph.D. thesis. Gorky, Gor'kovskij politehnicheskij institute Publ., 1985. 348 p. (In Russ.).
10. Basin A.M. Pitching of ships. Moscow, Transport Publ., 1969. 272 p. (In Russ.).
11. Korotkin A.I. The combined masses of the vessel. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1986. 312 p. (In Russ.).
12. Kalitkin N.N. Numerical methods. Moscow, Nauka Publ., 1978. 512 p. (In Russ.).
13. Borisov R.V., Molodozhnikov A.B. Compilation of systems of equations of pitching of semi-submersible floating drilling rigs on oblique waves. *Trudy LKI: Nadvodnye tehnicheskie sredstva osvoenija Mirovogo okeana*. Leningrad, LKI Publ., 1978, pp. 23–30. (In Russ.).

Информация об авторах

Балашов Михаил Георгиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Океанотехника и кораблестроение», Севастопольский государственный университет (Севастополь, Россия), evgenymensh@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-8519-2134>

Ваганов Александр Борисович – доктор технических наук, профессор кафедры «Аэро-гидродинамика, прочность машин и сопротивления материалов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (Нижний Новгород, Россия), yegor-timin@list.ru, <https://orcid.org/0009-0008-7173-602X>

Орлов Юрий Федорович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Прикладная математика», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (Нижний Новгород, Россия), fedor_pna@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-2258-1613>

Панов Алексей Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (Нижний Новгород, Россия), ivan_lisin_ggr@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4879-8858>

Савинов Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Аэро-гидродинамика, прочность машин и сопротивление материалов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (Нижний Новгород, Россия), oleg.mitin.nn@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-4115-2031>

Маштакова Екатерина Васильевна – магистрант кафедры «Энергетические установки и тепловые двигатели», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (Нижний Новгород, Россия), mashtakova45@yandex.ru

Information about the authors

Mikhail G. Balashov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of ocean engineering and shipbuilding, Sevastopol State University (Sevastopol, Russia), evgenymensh@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-8519-2134>

Alexander B. Vaganov, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of aero-hydrodynamics, strength of machines and resistance of materials, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (Nizhny Novgorod, Russia), yegor-timin@list.ru, <https://orcid.org/0009-0008-7173-602X>

Yuri F. Orlov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Applied Mathematics, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (Nizhny Novgorod, Russia), fedor_nna@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-2258-1613>

Alexey Y. Panov, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of theoretical and applied mechanics, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (Nizhny Novgorod, Russia), ivan_lisin_ggp@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4879-8858>

Vladimir N. Savinov, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Aero-hydrodynamics, strength of machines and resistance of materials, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (Nizhny Novgorod, Russia), <https://orcid.org/0009-0008-4115-2031>

Ekaterina V. Mashtakova, Master's Student of the Department of power plants and heat engines, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (Nizhny Novgorod, Russia), mashtakova45@yandex.ru

Вклад авторов

А.Б. Ваганов – разработка концепции; Ю.Ф. Орлов, А.Ю. Панов, В.Н. Савинов – сбор данных; М.Г. Балашов – анализ и интерпретация результатов; Е.В. Маштакова – подготовка и редактирование текста. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Contribution of the authors

A.B. Vaganov – concept development; Yu.F. Orlov, A.Yu. Panov, V.N. Savinov – data collection; M.G. Balashov – analysis and interpretation of results; E.V. Mashtakova – preparation and editing of the text. All the authors have read and approved the final version of the manuscript.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 16.01.2024; одобрена после рецензирования 16.02.2024; принята к публикации 15.03.2024.

Information about the article

The article was submitted: January 16, 2024; approved after reviewing: February 16, 2024; accepted for publication: March 15, 2024.