

**Яковлев Александр Анатольевич** – АО «Конструкторское бюро «Арсенал» им. М.В. Фрунзе; e-mail: aa.yakovlev@kbarsenal.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79052500726; к.т.н.; начальник управления.

**Сахабудинов Роман Владиславович** – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; e-mail: stapler1@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79211852881; к.т.н.; доцент.

**Голосий Александр Сергеевич** – e-mail: a.s.golosiy@mail.ru; тел.: +79211852881; к.т.н.; доцент.

**Chernus Peter Pavlovich** – BSTU "VOENMEH" D.F. Ustinova; e-mail: petr.chernus@yandex.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +78124900518; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Chernus Pavel Pavlovich** – e-mail: pavel.chernus@yandex.ru; phone: +78124900518; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Yakovlev Aleksandr Anatolievich** – ARSENAL DESIGN BUREAU JSK; e-mail: aa.yakovlev@kbarsenal.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79052500726; cand. of eng. sc.; head of department.

**Sakhabudinov Roman Vladislavovich** – Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: stapler1@yandex.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79211852881; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Golosiy Aleksandr Sergeevich** – e-mail: a.s.golosiy@mail.ru; phone: +79213025903; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 681.5, 517.935

DOI 10.18522/2311-3103-2024-2-59-69

**И.Ю. Липко**

## **ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС СТЕНДА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КАЧКИ КАТАМАРАНА В ВЕТРОВОЛНОВЫХ УСЛОВИЯХ**

*Статья посвящена актуальной теме имитации качки катамарана и программному обеспечению, алгоритмам позволяющим реализовать эту имитацию. Актуальность вытекает из необходимости тестировать навигационные устройства и их алгоритмы, строить большие тренажёрные комплексы имитации объектов надводного, воздушного и наземного базирования. Данная статья будет сосредоточена на описании программного и алгоритмического обеспечения для создания имитатора качки катамарана, находящегося на поверхности воды, при воздействии на него ветроволновых воздействий. Имитационный стенд для воспроизведения качки катамарана включает в себя платформу Стюарта, датчики, микроконтроллеры и персональный компьютер оператора. Верхняя часть платформы перемещается подобно палубе катамарана, а нижняя часть жёстко закреплена. Результаты экспериментов учитываются датчиками, закреплёнными на подвижной части, и обрабатываются микроконтроллером-прототипом навигационной системы. Считается, что навигационная система должна получать данные об объекте качки и возвращать оператору вектор состояния, содержащий угол и скорость крена, угол и скорость дифферента, высоту и скорость вертикальной качки. Применяемые математические модели описывают динамику катамарана и системы управления, уменьшающую амплитуду качки, внешние возмущения морской волны, формируемые по спектру Пирсона-Московица. Для получения траекторий качки катамарана реализован алгоритм Рунге-Кутты 4-го порядка с фиксированным шагом, а для фильтрации и восстановления полного вектора состояний катамарана реализован фильтр Калмана по схеме с «с задержкой». Разработано программное обеспечение для воспроизведения крена катамарана на имитационном стенде, фильтрации и восстановления вектора состояния, графического отображения результатов эксперимента в виде графиков, сохранения результатов в файлах. Для лучшей интерпретации результатов входные параметры графического интерфейса и алгоритмов имеют простые наглядные параметры: скорость и направление ветра, начальное состояние катамарана и служебные, а результаты представляются в виде графиков. В статье представлено подробное описание взаимосвязи модулей программ, применяемых математических алгоритмов, указаны входные и выходные параметры. Результаты имитации показывают достаточное качество воспроизведения качки катамарана. Однако были выявлены незначительные погрешности, связанные с механическими ограничениями применённой кинематической модели.*

*Имитационный стенд; качка катамарана; фильтр Калмана; программный комплекс; платформа Стюарта.*

I.Y. Lipko

## THE SOFTWARE PACKAGE FOR THE CATAMARAN ROLL STAND IN WIND WAVE CONDITIONS SIMULATION

*The article is devoted to the actual problem of catamaran roll imitation, software and algorithms that allow to implement this simulation. The relevance arises from the need to test navigation devices and their algorithms, to build large simulator complexes to reproduce roll and impulses of surface, air and ground-based vehicles. This article will focus on the description of software and algorithms for developing a roll simulator of a catamaran located on the sea surface when it disturbed by windwave influences. The simulation test bench for reproducing the catamaran roll includes a Stewart platform, sensors, micro-controllers and an operator's personal computer. The upper part of the platform moves like the deck of a catamaran, and the lower part is rigidly fixed. The experimental results are taken into account by sensors mounted on a movable part and processed by a microcontroller-navigation system prototype. It is believed that the navigation system should receive data about the pitching object and return to the operator a state vector containing the angle and speed of roll, angle and speed of pitch, height and speed of heave. The applied mathematical models describe the dynamics of a catamaran and a control system that reduces the amplitude of pitching, external disturbances of the sea wave formed by the Pearson-Moskowitz spectrum. To obtain the catamaran's roll trajectories, the Runge-Kutta 4th order algorithm with a fixed step is implemented, and for filtering and restoring the full vector of catamaran states the Kalman filter is implemented according to the "delayed" scheme. Software has been developed to reproduce the roll of a catamaran on a simulation test bench, filter and restore the state vector, graphically display the results of the experiment in the form of graphs, and save the results in files. For a better interpretation of the results, the input parameters of the graphical interface and algorithms have simple visual parameters: the wind speed and direction, the initial state of the catamaran and the service ones, and the results are presented in the form of graphs. The article provides a detailed description of the relationship between program modules, applied mathematical algorithms, and input and output parameters. The simulation results show a sufficient quality of reproduction of the rolling of the catamaran. However, minor errors were identified due to the mechanical limitations of the applied kinematic model.*

*Test bench; catamaran roll; Kalman filter; software package; Stewart platform.*

**Введение.** Данная статья посвящена разработке программного обеспечения и реализации алгоритмов для имитационного стенда качки катамарана. Имитационные стенды – это сложные устройства, состоящие из нескольких частей и предназначенные для тестирования электронных устройств или программного обеспечения бортовых систем, тренировки людей в условиях, максимально приближенных к естественным. По сравнению с численным моделированием у исследователя появляются условия, когда его теоретические модели не ограничены математическим представлением реального мира.

Рассматриваемый нами имитационный стенд предназначен для моделирования крена катамарана, а также для тестирования и отладки бортовых измерительных систем в реальных условиях и сбора данных для проверки теоретических результатов.

Имитация является одним из важных этапов проверки и тестирования работоспособности электронных устройств и систем [1, 2]. При разработке устройств имитационное тестирование проводится после моделирования и перед эксплуатацией. Моделирование необходимо для синтеза элементов управления и проверки алгоритмов на применимость. А цель имитационного моделирования состоит в воспроизведении поведения исследуемой системы на основе статистических и других представлений о поведении системы, с учётом наиболее существенных взаимосвязей между её элементами.

Известно, что при исследовании и моделировании судов исследователи используют бассейн для генерации волн [3, 4]. В этом бассейне в воде качается небольшой прототип реального судна. Специальный генератор волн создает волны, похожие на настоящие морские. Исследователь следит за положением судна, углами крена и т.д. Этот метод очень хорош для исследования мореходных качеств судна, но имеет ряд ограничений, например, сложность повторяемости, стоимость одного эксперимента.

Обычно необходимые алгоритмы для стенда включают в себя методы подготовки, проведения экспериментов и сбора результатов. Подготовка эксперимента включает генерацию траектории. Проведение и сбор результатов включают в себя контроль всех

действий, выполняемых стендом, регистрацию и сохранение данных. В нашем случае это соответственно: генерация траектории крена катамарана, фильтрация данных, сбор данных в файлы.

Стенд состоит из платформы Стюарта с нижней неподвижной частью и верхней подвижной частью, соответствующей палубе судна, а также рабочего места оператора на базе персонального компьютера.

Известно несколько примеров использования платформы Стюарта [5] для моделирования крена судов и морских сооружений при волнении моря [6–9]. Некоторые из них используют две объединенные платформы для моделирования морских волн (нижняя платформа) и палубы судна (верхняя платформа).

Аналогичная ситуация складывается и в других областях: автомобилестроении, самолетостроении и вертолетостроении [10–14], где тренажеры используются для обучения операторов машин или для тестирования устройств. Для перемещения подвижной части платформы в большинстве из них используются линейные приводы, такие как гидравлические, электромеханические или пневматические. Эти приводы имеют множество преимуществ, но очень дороги. В противовес им мы используем вращающиеся шаговые двигатели, которые менее дороги.

У нас есть несколько концептуальных требований к имитационному стенду и рабочему пространству оператора:

1. Простые интуитивно понятные параметры проведения экспериментов.
2. Необходимо повторять эксперимент много раз. Идеальная последовательность действий представляет собой цикл: задать входные данные, запустить эксперимент, собрать, показать и изучить данные, экспортировать данные в другие приложения. Например, мы разработали несколько прогнозирующих алгоритмов [15], которые должны быть протестированы в условиях, приближенных к реальным. Повторение экспериментов позволяет проверить качество алгоритмов и программ.
3. Имитационный стенд должен поддерживать установку большинства доступных датчиков.

Дальнейшее содержание статьи состоит из разделов, описывающих каждую часть стенда. В начале будет дано общее описание, тракты данных, конструкция и оснащение стенда, а затем подробнее каждый из блоков стенда. В конце показаны и обсуждены результаты воспроизведения траекторий стендом и заключение.

**Конструкция и аппаратное оснащение стенда.** В данном разделе описывается общая структура имитационного стенда, программное обеспечение, связь блоков, позволяющих воспроизводить качку катамарана, приём данных с датчиков и их обработку.

Разработанный стенд предназначен для имитации качки судна под воздействием внешних ветроволновых воздействий и отладки алгоритмов навигационных систем, алгоритмов прогноза и оценки рисков ситуаций качки катамарана. Физически стенд состоит из следующих связанных частей: компьютер для вычислений, микроконтроллер и платформа Стюарта, непосредственно реализующая качку. В созданной платформе Стюарта используются вращающиеся шаговые двигатели и ножки, соединяющие нижнюю и верхнюю части платформы (рис. 1), что позволило снизить стоимость конструкции. Все моторы, силовая электроника, микроконтроллер и провода закрыты жёстким металлическим каркасом чтобы защитить от несанкционированного доступа (рис. 2).

Компьютер выполняет программные блоки (рис. 3), которые реализованы в виде программных модулей, предназначенных для генерации качки катамарана и преобразования траектории качки в углы поворота моторов платформы Стюарта. Эти блоки по сути «порождают» качку для имитации.

Блок «Генерация траекторий» – это программа, предназначенная для создания траекторий качки катамарана. Программа запускается с использованием параметров командной строки или специального файла конфигурации. Параметры содержат в себе вектор начального состояния катамарана, «зерно» генератора случайных чисел, служебные

флаги. В результате программа создает CSV-файл, содержащий в каждой строке обратный отсчет времени и соответствующее состояние катамарана: угол и скорость крена, угол и скорость дифферента, высоту вертикальной качки. Для генерации траекторий применяется метод интегрирования Рунге-Кутты 4-го порядка с дискретным шагом.

«Блок пересчёта» решает обратную задачу кинематики и переводит движение по траектории крена в соответствующие сигналы управления двигателями платформы Стюарта. CSV-файл с траекторией из предыдущего блока является входными данными программы. Результатом этого блока является CSV-файл со строками, которые содержат углы поворота двигателей платформы. Специальная программа реализует выполнение перемещений платформы.

Блок «Моторы» – это физическая система связанных моторов, реализующих движение подвижной части платформы. Блок «Датчик углов» – это устройство, используемое для получения данных о текущем наклоне платформы и скорости этого наклона. Блок «Фильтрация и восстановление» – это программные модули, выполняющие операции обработки сырых данных от датчика, восстановлению полного вектора состояния и передающие результат в блок обработки «Расчёт оценок», в котором могут быть реализованы любые алгоритмы, необходимые для отладки навигационного оборудования.

По сути, группа из блоков «Датчик углов», «Фильтрация и восстановление», «Расчёт оценок» представляет собой прототип навигационного устройства для считывания данных о крене и его последующей обработки. Данные о крене принимаются датчиком, установленным на подвижной поверхности платформы, и передаются в микрокомпьютер, где производятся расчеты и отображаются на экране компьютера.

В нашем случае, в качестве прототипа, используются: 3DOF-сенсор MPU6050 для получения углов и ускорений качки и микроконтроллер NUCLEO-F401RE, на котором реализованы алгоритмы обработки данных от датчика, фильтрации и восстановления вектора состояния. Описанные выше блоки являются модулями разработанных программ и написаны на C++ в Qt Creator.

Оператор стенда через графический интерфейс программы имеет возможность задавать погодные условия, в которых будет функционировать судно, наблюдать за текущим положением и графиками качки.

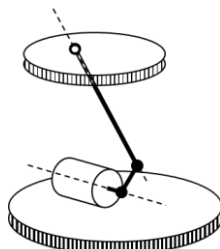


Рис. 1. Схема соединения одной опоры, мотора и оснований платформы Стюарта



Рис. 2. Стенд во время отладки устройства



Рис. 3. Тракт данных и параметров стенда

**Модель судна и возмущений.** В данном разделе даётся описание математических моделей катамарана с системой управления которая используется для моделирования и воспроизведения траекторий качки стендом, внешних ветроволновых возмущений.

Катамаран представляет собой судно с двумя одинаковыми симметричными корпусами, соединёнными палубой. Рассматриваемый катамаран помимо пера руля снабжён подводным крылом и подруливающими клапанами. Подводное крыло катамарана обеспечивает плавность движения на высоких скоростях, путём создания силы  $F_T$  и момента  $M_T$  на корпус судна, а подруливающие клапана создают силу  $F_F$  и момент  $M_F$  для изменения курса (рис. 4). В совокупности эти исполнительные механизмы вместе с пером руля позволяют уменьшить качку катамарана на волнении. Оперирование этими устройствами реализуется с помощью системы управления по обратной связи.

Используемая модель катамарана имеет следующие размеры: длина 90 м, ширина 25.96 м, осадка 2.6 м, водоизмещение 734.54 м.

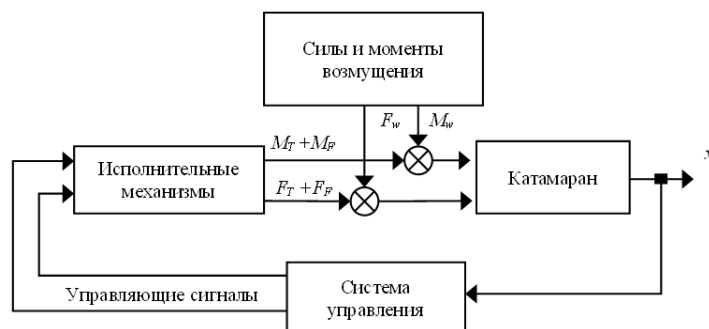


Рис. 4. Функциональная схема катамарана с системой управления

В общем случае в модели движения судна существует связь между всеми видами качки судна [16, 17]. Но в статье мы будем рассматривать только крен, угол дифферента и вертикальную качку катамарана, потому что именно они играют наибольшую роль при реализации различных опасных режимов [15, 18]. Уравнение пространства-состояния для катамарана:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B(u + w) \\ y = Cx \end{cases}, \quad (3)$$

где  $x = [\dot{\eta}, \zeta, \eta, \zeta, \dot{\theta}, \theta]$  – вектор состояния, включающий скорость вертикальной качки, скорость дифферента, вертикальная качка, угол дифферента, скорость крена, крен;  $u = \begin{bmatrix} F_T + F_F \\ M_T + M_F \end{bmatrix}$  – вектор управления, включающий силу и момент, возникающие на исполнительных механизмах,  $w = \begin{bmatrix} F_w \\ M_w \end{bmatrix}$  – вектор ветроволновых возмущений, включающий силу и момент, действующие на корпус судна; матрицы объекта и управления

$$A = \begin{bmatrix} -0.9073 & -25.1097 & -14.1503 & -17.4945 & 0.001 & 0 \\ 0.0514 & -0.503 & 0.2442 & -12.4 & 0.001 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.001 & 0.001 & -0.01 & -0.01 & -5 & -15 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.0082 & 0.0000083 \\ -0.00016 & 0.000017 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0.002 & 0.0000083 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

и матрица наблюдений

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

поскольку вертикальную качку реального судна измерить довольно трудно. Но для генерации траекторий используется единичная матрица  $C$ .

Объект-катамаран (тройка матриц  $\{A, B, C\}$  невырождена) замыкается обратной связью с линейно-квадратичным регулятором, обеспечивающим уменьшение амплитуды крена и дифферента (рис. 2), с матрицей

$$K = \begin{bmatrix} 59.3026 & 26.6427 & 18336.7 & 2006.9 & -1807.6 & -2950.1 \\ -1.2133 & 2.5576 & 14.2237 & -2.8566 & 2.1435 & 93.5241 \end{bmatrix}$$

в законе управления  $u = -Kx$ .

Морская волна, образуясь под влиянием ветра, создаёт силы и моменты, которые действуют на корпус катамарана. Энергия и статистика её распределения по частотам описывается спектром Пирсона-Московица.

Для симуляции действия морской волны используется формирующий фильтр, на выходе которого получаем силы и моменты (рис. 5). Сначала белый шум подаётся на вход блока линейной аппроксимации спектра Пирсона-Московица. Блок линейной аппроксимации спектра в качестве параметра принимает скорость ветра, влияющий на генерируемые погодные условия и желаемое состояние моря, а на выходе возвращает возвышение волны. Затем этот сигнал подаётся на блок линейной аппроксимации сил и моментов, в результате чего получаются силы и моменты, подаваемые на модель катамарана.

Спектр Пирсона-Московица  $S(\omega) = 8.1 \cdot 10^{-3} \cdot 9.8^2 \omega^{-5} e^{-0.74 \cdot g/v \cdot \omega^{-4}}$  линеаризован передаточной функцией второго порядка (рис. 6)

$$H_{\text{ПМ}}(s) = \frac{K_{\omega} s}{s^2 + 2\lambda\omega_0 s + \omega_0^2},$$

где  $K_{\omega} = 2\lambda\omega_0\sigma$  – коэффициент усиления,  $\sigma^2 = \max_{0 < \omega < 2\pi} S(\omega)$  – константа, описывающая интенсивность волнения,  $\lambda$  – демпфирующий коэффициент,  $\omega_0$  – доминирующая частота волнения,  $g = 9.8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения,  $v$  – скорость ветра м/с.

Передаточная функция блока линейной аппроксимации силы и момента представляется константой  $K_f$ . Она подбирается так, чтобы амплитуда результирующего сигнала удовлетворяла значащей высоте волны из статистических данных.

Адекватность полученной модели внешних возмущений на этапе создания контролировалась путём сопоставления статистики выхода блоков и значащих высот волн с имеющимися справочными данными статистики ветра и волнения морей [19].

В результате симулирования комплексной модели «внешние возмущения – катамаран» генерируется траектория движения судна, включающая в себя углы крена, дифферента и курса, высоту возвышения палубы на волне.



Рис. 5. Схема формирования сил и моментов внешнего возмущения

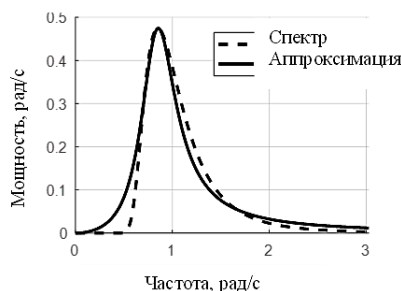


Рис. 6. Спектр Пирсона-Московица и его линейное приближение

**Фильтрация данных.** В данном разделе приводится описание результатов синтеза фильтра Калмана, используемого для фильтрации данных и восстановления полного вектора состояния катамарана.

Для получения фильтра Калмана комплексная система «катамаран с управлением и внешние возмущения» дискретизуется с тактом 0.01 с, поскольку этот фильтр будет функционировать на микроконтроллере. В результате синтеза с параметрами

$$Q = E(\gamma\gamma^T) = I_2 \cdot 10^7, \quad R = E(\zeta\zeta^T) = I_4 \cdot 10^{-1},$$

$$N = E(\gamma\zeta^T) = O_{2,4},$$

где  $I_n$  – единичная матрица размера  $n$ ,  $O_{n,m}$  – нулевая матрица с  $n$  строками и  $m$  столбцами,  $\gamma$  – шум в системе,  $\zeta$  – шум при измерении; имеем дискретный наблюдатель состояния, реализованный по схеме «с задержкой» [20], учитывающий только значения прошлого ( $n - 1$ ) шага

$$\hat{x}_{n+1,n} = (A_e - L_e C_e) \hat{x}_{n,n+1} + [B_e - L_e D_e \quad L_e] \cdot [O_{4,1} \quad y_{raw}]^T,$$

$$\begin{bmatrix} \hat{y}_{n,n-1} \\ \hat{x}_{n,n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_e \\ I_6 \end{bmatrix} \hat{x}_{n,n-1} + \begin{bmatrix} D_e & O_{10,4} \\ O_{6,4} & O_{6,4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} O_{4,1} \\ y_{raw} \end{bmatrix},$$

где  $\hat{x}_{n,n-1}$  – оценка состояния катамарана,  $\hat{y}_{n,n-1}$  – оценка выхода катамарана,  $y_{raw}$  – 4x1 вектор считанных с датчика значений,

$$A_e = \begin{bmatrix} 0.8770 & -0.0091 & -0.0762 & -0.0119 & 0.0053 & 0.0244 \\ -1.0854 & -0.0195 & -0.7805 & -0.1685 & -0.0077 & 0.4085 \\ 0.0067 & 0.0975 & 0.5590 & 0.0360 & -0.0055 & 0.0040 \\ -0.1307 & -0.7889 & -5.9193 & -0.0658 & -0.0661 & -0.0626 \\ 0.0004 & -0.0007 & 0.0075 & 0.0013 & 0.9390 & 0.0930 \\ 0.0013 & 0.0231 & 0.0866 & 0.0200 & -1.1861 & 0.8465 \end{bmatrix},$$

$$B_e = \begin{bmatrix} 0.0597 & 0.0857 & 0.0001 & 0.0003 \\ -0.0674 & 0.5716 & 0.0026 & 0.0359 \\ -0.0077 & -0.0980 & -0.0004 & -0.0067 \\ 0.1209 & 0.7826 & 0.0026 & 0.0231 \\ -0.0004 & 0.0007 & 0.0001 & 0.0003 \\ -0.0013 & -0.0229 & -0.0002 & 0.0004 \end{bmatrix},$$

$$C_e = \begin{bmatrix} I_2 & 0_{2,4} \\ 0_{2,4} & I_2 \\ I_6 \end{bmatrix}, D_e = 0_{10,4},$$

и матрица усиления, полученная в результате решения алгебраического уравнения Риккати:

$$L_e = \begin{bmatrix} 0.0597 & 0.0857 & 0.0001 & 0.0003 \\ -0.0674 & 0.5716 & 0.0026 & 0.0359 \\ -0.0077 & -0.0980 & -0.0004 & -0.0067 \\ 0.1209 & 0.7826 & 0.0026 & 0.0231 \\ -0.0004 & 0.0007 & 0.0001 & 0.0003 \\ -0.0013 & -0.0229 & -0.0002 & 0.0004 \end{bmatrix}.$$

Учитывая очевидные оптимизации (перемножение нулевых и единичных матриц) в вышеприведённом алгоритме, написан модуль, который используется в программе фильтрации и оценки вероятности.

**Результаты моделирования.** Рассмотрим несколько примеров работы имитационного стенда.

На рис. 7 показаны сгенерированная численным методом траектория (синим) и показания датчиков отработанного движения стендом (красным). Для рис. 7,а заданы параметры: скорость ветра 13.2 м/с, «зерно»-число 11622, вектор начального состояния нулевой, а для рис. 7,б заданы параметры: скорость ветра 12.9 м/с, «зерно»-число 25, вектор начального состояния нулевой

Результаты воспроизведения траектории достаточно хорошо повторяют основные движения, ошибка воспроизведения (рис. 8) находится на приемлемом уровне и в среднем не превышает  $0.5^\circ$  за редким исключением в  $1^\circ$  для крена и в среднем не превышает  $0.03^\circ$  за редким исключением в  $0.05^\circ$  для дифферента. Однако при более пристальном наблюдении можно увидеть, что в некоторых случаях не происходит воспроизведения граничных значений крена, как, например на рис., 50-60 с, 110-120 с, 160-170 с.

Основная причина этого была выявлена в ходе нескольких экспериментов и наблюдений. Она заключается в ограничении кинематических конфигураций опоры вала мотора и ножек, соединённых с подвижной платформой. Шаровые шарниры в подошве ножек являются слабым местом этой конструкции, что приводит к небольшому дребезжанию во время движения. Шум не виден глазами, но заметный датчиком. Чтобы уменьшить этот шум, мы используем балластный груз на верхней поверхности, который существенно снижает этот дребезг.

За время эксплуатации стенда проблем с программным обеспечением не возникало.

**Заключение.** Разработанное программное обеспечение успешно генерирует траекторию движения катамарана, качественно фильтрует и восстанавливает выходной сигнал. Механически стенд воспроизводит сигнал также качественно с редкими нюансами, заключающимися в особенностях кинематических связей платформы Стюарта.

Программное обеспечение прототипа навигационной системы имеет небольшой размер и оптимизированно, что позволяет выполнять его на микроконтроллере: фильтрация и восстановление вектора состояния с помощью фильтра Калмана.



Дальнейшая работа над улучшением стенда заключается в программной реализации других алгоритмов создания траекторий для других типов судов, алгоритмов фильтрации данных, улучшении механических характеристик стенда.

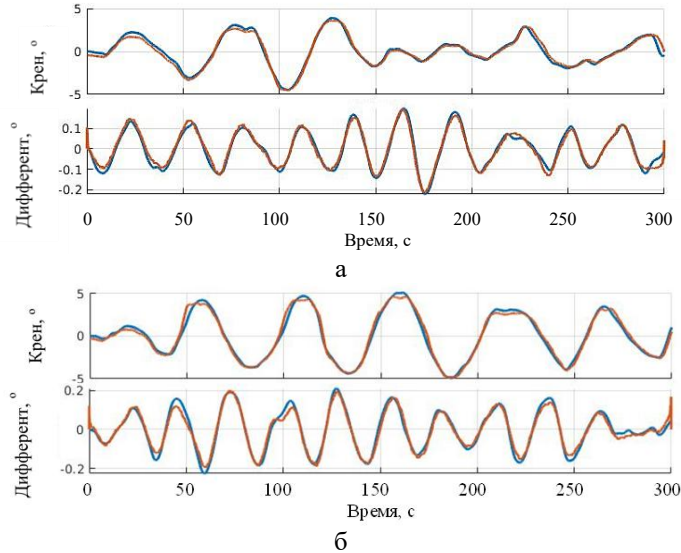


Рис. 7. Сравнение реализаций качки симуляции (синим) с воспроизведением имитатором (красным) для крена и дифферента

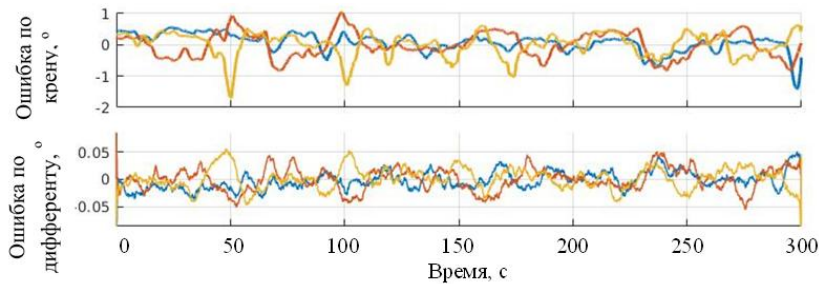


Рис. 8. Ошибки воспроизведения траекторий в трёх реализациях по крену и дифференту

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вагуценко Л.Л., Вагуценко А.Л., Заичко С.И. Бортовые автоматизированные системы контроля мореходности. – Одесса: Феникс, 2005. – 272 с.
2. Бородай И.К., Живица С.Г., Платонов В.Г. Мореходность корабля и пути ее изучения (к 50-летию лаборатории мореходности) // Тр. Крыловского государственного научного центра. – 2018. – № 2 (384). – С. 147-152.
3. Akhmediev N., Chabchoub A., Hoffmann N., Onorato M. Super Rogue Waves: Observation of a Higher-Order Breather in Water Waves // Phys. Rev. – 2012. – P. 2-7.
4. Dematteis G., Grafke T., Vanden-Eijnden E. Rogue Waves and Large Deviations in Deep Sea // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2018. – Vol. 115, No. 5. – P. 855-860.
5. Stewart D. A Platform with Six Degrees of Freedom // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. – 1965. – Vol. 180. – P. 371-378.
6. Andrievsky B. et al. Control of pneumatically actuated 6-DOF Stewart platform for driving simulator // 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Miedzyzdroje, 2014. – P. 663-668.
7. Krasnov E.I., Mikhaylov V.V., Sergeev S.L., Stuchenkov A.B. Development of a motion system for a training simulator based on Stewart platform // International Conference “Stability and Control Processes” in Memory of V.I. Zubov, St. Petersburg, 2015. – P. 99-101.

8. *Silva- uñiz Diego, Campos Julio, Fernández Enrique*. Stewart Platform Motion Control Automation with Industrial Resources to Perform Cycloidal and Oceanic Wave Trajectories // *Machines*. – 2022. – DOI: 10.711.10.3390/machines10080711.
9. *Lebrón ., Valente V., Sobczyk ., Perondi E*. Control of an Electrohydraulic Stewart Platform Manipulator as Vessels Motion Simulator // 9th FPNI Ph.D. Symposium on Fluid Power, 2016. – V001T01A033. – DOI: 10.1115/FPNI2016-1553.
10. *Villacís C. et al*. Real-time flight simulator construction with a network for training pilots using mechatronics and cyber-physical system approaches // 2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering, Chennai. – P. 238-247.
11. *Advani Sunjoo, Hosman Ruud, Potter Mario*. Objective Motion Fidelity Qualification in Flight Training Simulators. – 2007. – DOI: 10.2514/6.2007-6802.
12. *Affan Muhammad, Ahmed Syed, Manek Ali, Uddin Riaz*. Design and Implementation of the Washout Filter for the Stewart-Gough Motion Platform. – 2019. – P. 415-419.
13. *Zhu Daoyang, Yan Jun, Duan Shaoli*. A Design of Nonlinear Scaling and Nonlinear Optimal Motion Cueing Algorithm for Pilot's Station // *Wuhan University Journal of Natural Sciences*. – 2021. – Vol. 26. – P. 513-520.
14. *Lukianov Petro, Kabanyachyi Volodymyr*. Mathematical model of stable equilibrium operation of the flight simulator based on the Stewart platform // *Aviation*. – 2023. – Vol. 27. – P. 119-128.
15. *Лунко И.Ю.* Моделирование редких событий качки беспилотного катамарана // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2021. – № 4-1 (54). – С. 219-226.
16. *Fossen T.I*. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. – Jhon Wiley & Sons, 2011. – ISBN 978-1-119-99149-6.
17. *Kramar V*. Development of the particular vessel mathematical models // *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*. – 2016. – Vol. 27, Issue 1. – P. 34-39.
18. *Galeazzi R., Christian H., Mogens B., Fossen T. I*. Stabilisation of parametric roll resonance by combined speed and fin stabilizer control // *Proceedings of the European Control Conference, Budapest, Hungary, 2009*. – P. 4895-4900.
19. *Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Чернышева Е.С.* Справочные данные по режиму ветра и волнения Берингова и Белого морей. Российский морской регистр судоходства, 2010. – 566 с. – ISBN 978-5-89331-135-8.
20. *Lewis F.L., Xie L., Popa D*. Optimal and Robust Estimation: With an Introduction to Stochastic Control Theory. – 2nd ed. – CRC Press, 2017.

## REFERENCES

1. *Vagushchenko L.L., Vagushchenko A.L., Zaichko S.I*. Bortovye avtomatizirovannye sistemy kontrolya morekhodnosti [Onboard automation systems of seakeeping]. Odessa: Feniks, 2005, 272 p.
2. *Boroday I.K., Zhivitsa S.G., Platonov V.G*. Morekhodnost' korablya i puti ee izucheniya (k 50-letiyu laboratorii morekhodnosti) [Ship seakeeping and the ways of studying it (to the 50th anniversary of Seakeeping Laboratory)], *Tr. Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* [Transactions of the Krylov State Research Centre], 2018, No. 2 (384), pp. 147-152.
3. *Akhmediev N., Chabchoub A., Hoffmann N., Onorato M*. Super Rogue Waves: Observation of a Higher-Order Breather in Water Waves // *Phys. Rev.* – 2012. – P. 2-7.
4. *Dematteis G., Grafke T., Vanden-Eijnden E*. Rogue Waves and Large Deviations in Deep Sea, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, Vol. 115, No. 5, pp. 855-860.
5. *Stewart D*. A Platform with Six Degrees of Freedom, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1965, Vol. 180, pp. 371-378.
6. *Andrievsky B. et al*. Control of pneumatically actuated 6-DOF Stewart platform for driving simulator, *19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Miedzyzdroje, 2014*, pp. 663-668.
7. *Krasnov E.I., Mikhaylov V.V., Sergeev S.L., Stuchenkov A.B*. Development of a motion system for a training simulator based on Stewart platform, *International Conference "Stability and Control Processes" in memory of V.I. Zubov, St. Petersburg, 2015*, pp. 99-101.
8. *Silva- uñiz Diego, Campos Julio, Fernández Enrique*. Stewart Platform Motion Control Automation with Industrial Resources to Perform Cycloidal and Oceanic Wave Trajectories, *Machines*, 2022. DOI: 10.711.10.3390/machines10080711.
9. *Lebrón ., Valente V., Sobczyk ., Perondi E*. Control of an Electrohydraulic Stewart Platform Manipulator as Vessels Motion Simulator, *9th FPNI Ph.D. Symposium on Fluid Power, 2016*. V001T01A033. DOI: 10.1115/FPNI2016-1553.

10. Villacís C. et al. Real-time flight simulator construction with a network for training pilots using mechatronics and cyber-physical system approaches, *2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering, Chennai*, pp. 238-247.
11. Advani Sunjoo, Hosman Ruud, Potter Mario. Objective Motion Fidelity Qualification in Flight Training Simulators, 2007. DOI: 10.2514/6.2007-6802.
12. Affan Muhammad, Ahmed Syed, Manek Ali, Uddin Riaz. Design and Implementation of the Washout Filter for the Stewart-Gough Motion Platform, 2019, pp. 415-419.
13. Zhu Daoyang, Yan Jun, Duan Shaoli. A Design of Nonlinear Scaling and Nonlinear Optimal Motion Cueing Algorithm for Pilot's Station, *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2021, Vol. 26, pp. 513-520.
14. Lukianov Petro, Kabanyachyi Volodymyr. Mathematical model of stable equilibrium operation of the flight simulator based on the Stewart platform, *Aviation*, 2023, Vol. 27, pp. 119-128.
15. Lipko I.Yu. Modelirovanie redkikh sobyitij kachki bespilnogo katamarana [Rare roll event modeling of unmanned catamaran], *Morskie intellektual'nye tekhnologii* [Marine intellectual technologies], 2021, No. 4-1 (54), pp. 219-226.
16. Fossen T.I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. Jhon Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-1-119-99149-6.
17. Kramar V. Development of the particular vessel mathematical models, *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, 2016, Vol. 27, Issue 1, pp. 34-39.
18. Galeazzi R., Christian H., Mogens B., Fossen T. I. Stabilisation of parametric roll resonance by combined speed and fin stabilizer control, *Proceedings of the European Control Conference, Budapest, Hungary, 2009*, pp. 4895-4900.
19. Lopatukhin L.I., Bukhanovskiy A.V., Chernysheva E.S. Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volneniya Beringova i Belogo morey [Reference data on the wind and wave regime of the Bering and White Seas]. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva [Russian Maritime Register of Shipping], 2010, 566 p. ISBN 978-5-89331-135-8.
20. Lewis F.L., Xie L., Popa D. Optimal and Robust Estimation: With an Introduction to Stochastic Control Theory. 2nd ed. CRC Press, 2017.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Х. Пшихопов.

**Липко Иван Юрьевич** – Севастопольский государственный университет; e-mail: ivanlipko@yandex.ru; г. Севастополь, Россия; тел. +79787391279; старший преподаватель; научный сотрудник.

**Lipko Ivan Urievich** – Sevastopol State University; e-mail: ivanlipko@yandex.ru; Sevastopol, Russia; phone +79787391279; senior lecturer; research officer.

УДК 631.171:303.732.4

DOI 10.18522/2311-3103-2024-2-69-82

**В.В. Соловьев, А.Я. Номерчук, Р.К. Филатов**

### **СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ НАЗЕМНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Целью данной работы является проведение системного анализа мобильных роботизированных платформ, которые могут использоваться в сельском хозяйстве для транспортировки грузов и прополки сорняков. Данное исследование является актуальным из-за увеличения численности населения, уменьшения пахотных площадей, естественного оттока населения из сельской местности и снижения количества сельскохозяйственной техники. Для достижения поставленной цели в работе сформировано «дерево» целей системного анализа конструктивного исполнения платформ, которые предваряют и декомпозируют этапы проектирования и разработки роботов сельскохозяйственного назначения. Из-за наличия нечетких и вербальных показателей оценки экспертами роботизированных платформ, авторы предлагают определять их в виде нечетких интервалов, которые с применением аддитивной свертки позволяют получить комплексный показатель, который может представлять либо в нечетком виде, либо в виде пессимистической, оптимистической или нейтральной оценок. При этом весовые коэффициенты аддитивной свертки также можно представить в нечетком виде. Для этого предложены операции умножения и сложения нечетких интервалов. Для проведения имитационного моделирования представлена струк-