

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 519.876.5

DOI: 10.17212/2782-2001-2024-1-21-40

Моделирование платформы Гью – Стюарта, размещенной на мобильном объекте, в обстановке внешних возмущений*

А.М. КОРИКОВ^а, В.Т. ТРАН^б

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники

^а anatolii.m.korikov@tusur.ru

^б att82glass@gmail.com

В статье решаются задачи, возникающие при создании систем автоматической стабилизации, расположенных на мобильных объектах. Отмечены достоинства и недостатки известных типов систем автоматической стабилизации. Платформа Гью – Стюарта – одно из устройств, используемых в данных системах. В статье представлены результаты математического моделирования платформы Гью – Стюарта, расположенной на мобильном объекте, в обстановке внешних возмущений. Такая обстановка типична для платформы, размещенной на корабле, постоянно находящейся в условиях непредсказуемых возмущений водной среды. Платформа Гью – Стюарта состоит из шести гидравлических цилиндров, одни концы которых соединены непосредственно с палубой корабля, а другие концы гидроцилиндров связаны с платформой для установки оборудования, приборов и устройств, положение которых в пространстве должно быть стабильным. Стабилизация платформы Гью – Стюарта обеспечивается изменением длины шести гидроцилиндров по определенным алгоритмам для обеспечения устойчивости системы автоматической стабилизации. Математическое моделирование платформы Гью – Стюарта усложняется не только тем, что должно быть учтено вращательное взаимодействие шести связанных между собой твердых тел (гидроцилиндров) – компонент платформы, но и необходимостью учета влияния на платформу неизвестных возмущений (при моделировании платформы Гью – Стюарта, расположенной на корабле, необходим учет влияния непредсказуемых водных (морских, океанских) возмущений). В статье выполнено построение кинематической модели платформы Гью – Стюарта, обоснован выбор скользящих режимов при реализации алгоритмов управления гидроцилиндрами для стабилизации платформы и предложена адаптация этих режимов на основе нейронных сетей для учета влияния неизвестных возмущений. Результаты моделирования в программной среде MATLAB доказывают эффективность предложенных моделей и алгоритмов управления платформы Гью – Стюарта.

Ключевые слова: система автоматической стабилизации, мобильный объект, платформа Гью – Стюарта, математическое моделирование, внешние возмущения, гидравлический цилиндр, устойчивость, кинематическая модель, скользящий режим, нейронная сеть, управление

* Статья получена 21 декабря 2023 г.

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы стабилизации положения оборудования, размещенного на мобильных объектах, в пространстве при их движении в любой среде (по суше, в воздухе, по воде) актуальны для многих отраслей науки, техники, сельского хозяйства, промышленности и обороны страны. Множество рассматриваемых мобильных объектов является разнообразным и многочисленным. В этом множестве представлены различные транспортные средства. На всех мобильных объектах (автомобили, танки, подвижные ракетные комплексы, корабли, самолеты и т. п.) имеется различное оборудование, которое в процессе функционирования должно иметь заданную ориентацию в пространстве. Эту ориентацию постоянно нарушают различные возмущения из внешней среды и/или изменяющиеся параметры самого мобильного объекта. Например, при установке навигационного оборудования, радиолокационных антенн и антенн систем связи на палубе корабля значительное влияние на эффективность работы оборудования оказывают волновые возмущения водной среды [1–5]. Для уменьшения влияния этих возмущений навигационное оборудование размещают на стабилизируемой платформе [1, 2, 6–9].

Назначение системы автоматической стабилизации (САС) состоит в обеспечении заданного положения платформы в выбранной системе координат. Или, иначе, задача САС состоит в поддержании заданных параметров углового положения платформы с установленными на ней специальными приборами и выработке управляющих (корректирующих) сигналов. Параметры положения платформы и управляющие сигналы САС могут определяться и поддерживаться различными приборами и устройствами: электро-механическими измерителями угловых ускорений и скоростей, лазерными датчиками угловых скоростей, гидравлическими стабилизаторами, гироскопическими стабилизаторами, САС карданного типа и т. п. Для решения задач стабилизации оборудования на мобильных объектах наибольшее распространение получили САС, базирующиеся на последних трех типах приборов и устройств [10–14]. Оборудование на мобильных объектах может размещаться как на последовательных стабилизированных платформах, так и на параллельных стабилизированных платформах [2, 14]. В [2] отдано предпочтение последовательной стабилизированной платформе. В настоящей работе исследуются возможности параллельных стабилизированных платформ для построения САС. Широкую известность среди параллельных стабилизированных платформ получила платформа Гью – Стюарта (ПГС) [15–18]. ПГС – одно из параллельных устройств, успешно применяемых в САС. Применение ПГС не ограничивается САС на мобильных объектах: известно широкое использование ПГС в промышленности (металлообработка), в обучении (имитаторы авиатехники) и т. д. [16–18]. ПГС обладают большой рабочей мощностью и высоким быстродействием (быстрой реакцией на управляющие воздействия). Отмеченные достоинства ПГС вполне объясняют их применение в САС. ПГС состоит из шести гидравлических цилиндров (гидроцилиндров), одни концы которых соединены непосредственно с мобильным объектом (например, с палубой надводного корабля), а другие концы гидроцилиндров связаны с платформой для установки оборудования, приборов, устройств, положение которых в пространстве должно быть стабильным. Стабилизация

ПГС обеспечивается изменением длины шести гидроцилиндров по определенным алгоритмам для обеспечения устойчивости САС. Математическое моделирование ПГС усложняется не только тем, что должно быть учтено вращательное взаимодействие шести связанных между собой твердых тел (гидроцилиндров) – компонент ПГС, но и необходимостью учета влияния на ПГС неизвестных возмущений (например, при моделировании ПГС, расположенной на корабле, необходим учет влияния непредсказуемых водных (морских, океанских) возмущений). Из вышеизложенного следует актуальность задачи математического моделирования ПГС, расположенной на мобильном объекте в обстановке внешних возмущений.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Общий вид, структурная схема и координатные системы исследуемой ПГС представлены на рис. 1.

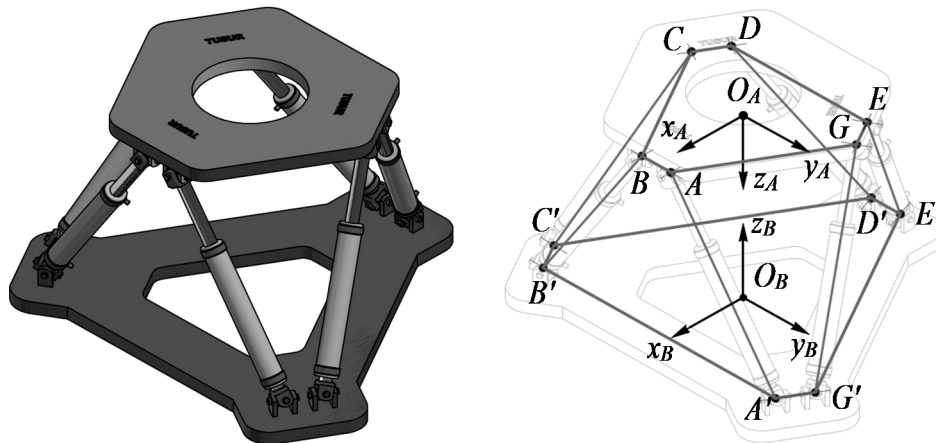


Рис. 1. Общий вид и структура платформы Гью – Стьюарта

Fig. 1. General view and structure of the Hugh – Stewart platform

На рис. 1 плоскость $ABCDEG$ является рабочей плоскостью ПГС, положение которой должно быть стабильным. На рабочей плоскости устанавливаются оборудование и другие объекты, положение которых в пространстве также должно быть стабильным. Например, на этой плоскости возможно размещение посадочной площадки (ПП) для вертолетов и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В такой постановке задача стабилизации ПП для посадки вертолетов и БПЛА имеет очевидную актуальность. Плоскость $A'B'C'D'E'G'$ – это плоскость, непосредственно связанная с корпусом движущегося мобильного объекта. Конкретизируем постановку задачи и предположим, что мобильный объект – корабль, тогда плоскость $A'B'C'D'E'G'$ жестко связана с палубой корабля. С учетом сделанных предположений система координат $O_A x_A y_A z_A$ является системой координат, привязанной к ПП, а система координат $O_B x_B y_B z_B$ – системой координат, привязанной к палубе корабля. В начальном состоянии плоскости $ABCDEG$ и плоскости $A'B'C'D'E'G'$

являются параллельными, и начальное расстояние между этими двумя плоскостями равно h ; ПП связана с плоскостью палубы корабля шестью гидроцилиндрами: AA' , BB' , CC' , DD' , EE' и GG' . Гидроцилиндры имеют длины l_1 , l_2 , l_3 , l_4 , l_5 и l_6 соответственно. Длина гидроцилиндров может изменяться для изменения наклона ПП относительно плоскости палубы. В начальном состоянии гидроцилиндры имеют одинаковую длину, равную l_0 . Гидроцилиндры соединены с ПП и плоскостью палубы карданными шарнирами. Если корабль находится в море, то под воздействием морских волн палуба корабля качается, и эта качка действует на указанные выше плоскости ПГС. В частности, возможно, что плоскость палубы будет вращаться вокруг координатных осей O_Bx_B , O_By_B , O_Bz_B и перемещаться по этим координатным осям. ПП связана с плоскостью палубы шестью гидроцилиндрами, поэтому ПП также будет совершать поступательное и вращательное движения. Движения палубы влияют на ПП и, следовательно, на взлет и посадку вертолетов и БПЛА.

В такой постановке решаются следующие задачи: расчет параметров гидроцилиндров для стабилизации ПП на корабле с помощью ПГС; анализ процессов стабилизации ПП по координатным осям O_Ax_A и O_Ay_A ; синтез алгоритмов управления гидроцилиндрами при поступательном движении с неопределенной и непредсказуемо изменяющейся нагрузкой; моделирование в программной среде MATLAB разработанных моделей и алгоритмов управления ПГС.

2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОЦИЛИНДРОВ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОСАДОЧНОЙ ПЛОЩАДКИ

Методику расчета параметров гидроцилиндров, необходимых для стабилизации ПП на корабле с помощью ПГС, изложим на примере расчета длины гидроцилиндра (этим термином определим длину ноги гидроцилиндра, т.е. ПГС имеет шесть ног (см. рис. 1)) для стабилизации ПП. Допустим, что на рис. 1 начальные координаты точек A' , B' , C' , D' , E' и G' в системе координат $O_Bx_By_Bz_B$ имеют соответственно следующие обозначения: $A'(x_{0A'}, y_{0A'}, 0)$; $B'(x_{0B'}, y_{0B'}, 0)$; $C'(x_{0C'}, y_{0C'}, 0)$; $D'(x_{0D'}, y_{0D'}, 0)$; $E'(x_{0E'}, y_{0E'}, 0)$ и $G'(x_{0G'}, y_{0G'}, 0)$. Точки A , B , C , D , E и G имеют начальные координаты: $A(x_{0A}, y_{0A}, h)$; $B(x_{0B}, y_{0B}, h)$; $C(x_{0C}, y_{0C}, h)$; $D(x_{0D}, y_{0D}, h)$; $E(x_{0E}, y_{0E}, h)$ и $G(x_{0G}, y_{0G}, h)$.

Обозначим через φ угол поворота системы координат $O_Ax_Ay_Az_A$ относительно системы координат $O_Bx_By_Bz_B$ вокруг оси O_Bx_B ; через θ – угол поворота системы координат $O_Ax_Ay_Az_A$ относительно системы координат $O_Bx_By_Bz_B$ вокруг оси O_By_B ; через ψ – угол поворота системы координат $O_Ax_Ay_Az_A$ относительно системы координат $O_Bx_By_Bz_B$ вокруг оси O_Bz_B .

Пусть $\mathbf{R}_x$, $\mathbf{R}_y$, $\mathbf{R}_z$ – матрицы, определяющие вращение системы координат $O_A x_A y_A z_A$ относительно системы координат $O_B x_B y_B z_B$ вокруг осей $O_B x_B$, $O_B y_B$, $O_B z_B$; соответствующие угловые повороты равны φ , θ , ψ . Матрицы $\mathbf{R}_x$, $\mathbf{R}_y$, $\mathbf{R}_z$ определяются следующими формулами:

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}; \quad \mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

С помощью ПГС имеется возможность стабилизации ПП по шести степеням свободы, включая три степени вращательного движения при вращении корабля вокруг осей $O_B x_B$, $O_B y_B$, $O_B z_B$ на углы поворота φ , θ , ψ и три степени подвижности при поступательном движении корабля по этим осям.

Учитывая специфику ПП и рабочие характеристики ПГС, а также известные характеристики надводных кораблей, в данном исследовании выполняется расчет шести длин гидроцилиндров для стабилизации ПП только по двум координатным осям $O_A x_A$, $O_A y_A$. То есть выполняется стабилизация ПП по двум вращательным степеням движения, стабилизация вращения ПП по третьей координатной оси и по координатам поступательного движения не выполняется.

3. СТАБИЛИЗАЦИЯ ПОСАДОЧНОЙ ПЛОЩАДКИ ПО ДВУМ КООРДИНАТАМ

Предположим, что корабль под воздействием морских волн и погодных факторов совершает поворот на угол θ вокруг оси $O_B y_B$. Поэтому, чтобы состояние ПП на палубе корабля было устойчивым, необходим поворот ПП вокруг оси $O_A y_A$ также на угол θ , но в противоположную сторону.

На первом этапе для стабилизации ПП по оси $O_A y_A$ необходимо переместить начало координат O_A системы координат $O_A x_A y_A z_A$ так, чтобы O_A совпало с O_B – началом системы координат $O_B x_B y_B z_B$. Затем на втором этапе необходимо вращать систему координат $O_A x_A y_A z_A$ вокруг оси $O_B y_B$ системы координат $O_B x_B y_B z_B$.

Если выполнен поворот ПП вокруг оси $O_B y_B$ на угол θ , то новые координаты точек A, B, C, D, E и G определяются по формулам:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A} &= [x_{1A} \quad y_{1A} \quad z_{1A}]^T = \mathbf{R}_y [x_{0A} \quad y_{0A} \quad 0]^T; \\
 \mathbf{B} &= [x_{1B} \quad y_{1B} \quad z_{1B}]^T = \mathbf{R}_y [x_{0B} \quad y_{0B} \quad 0]^T; \\
 \mathbf{C} &= [x_{1C} \quad y_{1C} \quad z_{1C}]^T = \mathbf{R}_y [x_{0C} \quad y_{0C} \quad 0]^T; \\
 \mathbf{D} &= [x_{1D} \quad y_{1D} \quad z_{1D}]^T = \mathbf{R}_y [x_{0D} \quad y_{0D} \quad 0]^T; \\
 \mathbf{E} &= [x_{1E} \quad y_{1E} \quad z_{1E}]^T = \mathbf{R}_y [x_{0E} \quad y_{0E} \quad 0]^T; \\
 \mathbf{G} &= [x_{1G} \quad y_{1G} \quad z_{1G}]^T = \mathbf{R}_y [x_{0G} \quad y_{0G} \quad 0]^T.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Объединив уравнения (1) и (2), получим:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} x_{1A} \\ y_{1A} \\ z_{1A} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{0A} \cos \theta \\ y_{0A} \\ x_{0A} \sin \theta \end{bmatrix}; & \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} x_{1B} \\ y_{1B} \\ z_{1B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{0B} \cos \theta \\ y_{0B} \\ x_{0B} \sin \theta \end{bmatrix}; \\
 \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} x_{1C} \\ y_{1C} \\ z_{1C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{0C} \cos \theta \\ y_{0C} \\ x_{0C} \sin \theta \end{bmatrix}; & \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} x_{1D} \\ y_{1D} \\ z_{1D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{0D} \cos \theta \\ y_{0D} \\ x_{0D} \sin \theta \end{bmatrix}; \\
 \mathbf{E} &= \begin{bmatrix} x_{1E} \\ y_{1E} \\ z_{1E} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{0E} \cos \theta \\ y_{0E} \\ x_{0E} \sin \theta \end{bmatrix}; & \mathbf{G} &= \begin{bmatrix} x_{1G} \\ y_{1G} \\ z_{1G} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{0G} \cos \theta \\ y_{0G} \\ x_{0G} \sin \theta \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Пусть под воздействием морских волн и погодных факторов палуба корабля продолжает поворот на угол φ вокруг оси $O_B x_B$. Чтобы состояние ПП на корабле было устойчивым, необходимо продолжить вращение ПП вокруг оси $O_B x_B$ на угол φ , но в противоположную сторону. Это значит, что продолжается вращение системы координат $O_A x_A y_A z_A$ вокруг оси $O_B x_B$ в системе координат $O_B x_B y_B z_B$ на угол φ .

Если выполнен поворот ПП вокруг оси O_Bx_B на угол φ , то новые координаты точек A, B, C, D, E и G определяются по формулам:

$$\begin{aligned}\mathbf{A} &= [x_{2A} \ y_{2A} \ z_{2A}]^T = \mathbf{R}_x [x_{1A} \ y_{1A} \ z_{1A}]^T; \\ \mathbf{B} &= [x_{2B} \ y_{2B} \ z_{2B}]^T = \mathbf{R}_x [x_{1B} \ y_{1B} \ z_{1B}]^T; \\ \mathbf{C} &= [x_{2C} \ y_{2C} \ z_{2C}]^T = \mathbf{R}_x [x_{1C} \ y_{1C} \ z_{1C}]^T; \\ \mathbf{D} &= [x_{2D} \ y_{2D} \ z_{2D}]^T = \mathbf{R}_x [x_{1D} \ y_{1D} \ z_{1D}]^T; \\ \mathbf{E} &= [x_{2E} \ y_{2E} \ z_{2E}]^T = \mathbf{R}_x [x_{1E} \ y_{1E} \ z_{1E}]^T; \\ \mathbf{G} &= [x_{2G} \ y_{2G} \ z_{2G}]^T = \mathbf{R}_x [x_{1G} \ y_{1G} \ z_{1G}]^T.\end{aligned}\tag{4}$$

Объединив уравнения (1) и (4), получим:

$$\begin{aligned}\mathbf{A} &= \begin{bmatrix} x_{2A} \\ y_{2A} \\ z_{2A} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1A} \\ y_{1A} \cos \varphi + z_{1A} \sin \varphi \\ -y_{1A} \sin \varphi + z_{1A} \cos \varphi \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} x_{2B} \\ y_{2B} \\ z_{2B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1B} \\ y_{1B} \cos \varphi + z_{1B} \sin \varphi \\ -y_{1B} \sin \varphi + z_{1B} \cos \varphi \end{bmatrix}; \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} x_{2C} \\ y_{2C} \\ z_{2C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1C} \\ y_{1C} \cos \varphi + z_{1C} \sin \varphi \\ -y_{1C} \sin \varphi + z_{1C} \cos \varphi \end{bmatrix}; \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} x_{2D} \\ y_{2D} \\ z_{2D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1D} \\ y_{1D} \cos \varphi + z_{1D} \sin \varphi \\ -y_{1D} \sin \varphi + z_{1D} \cos \varphi \end{bmatrix}; \\ \mathbf{E} &= \begin{bmatrix} x_{2E} \\ y_{2E} \\ z_{2E} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1E} \\ y_{1E} \cos \varphi + z_{1E} \sin \varphi \\ -y_{1E} \sin \varphi + z_{1E} \cos \varphi \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} x_{2G} \\ y_{2G} \\ z_{2G} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1G} \\ y_{1G} \cos \varphi + z_{1G} \sin \varphi \\ -y_{1G} \sin \varphi + z_{1G} \cos \varphi \end{bmatrix}.\end{aligned}\tag{5}$$

После выполнения поворота системы координат и расчета новых координат точек A, B, C, D, E и G начало O_A системы координат $O_Ax_Ay_Az_A$ перемещается в новое начальное положение (новое начало O_A в системе координат $O_Bx_By_Bz_B$ имеет координаты $O_A(0, 0, h)$). Выполним обновление координат точек A, B, C, D, E и G в системе координат $O_Bx_By_Bz_B$. Новые координаты точек A, B, C, D, E и G определяются по формулам:

$$\begin{aligned}\mathbf{A} &= [x_{2A} \ y_{2A} \ z_{2A} + h]^T; \quad \mathbf{B} = [x_{2B} \ y_{2B} \ z_{2B} + h]^T; \\ \mathbf{C} &= [x_{2C} \ y_{2C} \ z_{2C} + h]^T; \quad \mathbf{D} = [x_{2D} \ y_{2D} \ z_{2D} + h]^T; \\ \mathbf{E} &= [x_{2E} \ y_{2E} \ z_{2E} + h]^T; \quad \mathbf{G} = [x_{2G} \ y_{2G} \ z_{2G} + h]^T.\end{aligned}\tag{6}$$

Таким образом, при повороте корабля на углы φ, θ вокруг осей $O_B x_B$, $O_B y_B$ для устойчивости ПП точки A, B, C, D, E и G должны иметь координаты, определяемые по формулам (6). С другой стороны, координаты точек A', B', C', D', E' , и G' в системе координат $O_B x_B y_B z_B$ фиксированы, поэтому, используя квадратичную норму, определим длину каждого из шести гидроцилиндров в следующем виде:

$$\begin{aligned} l_1 &= \|\overline{AA'}\| = \text{norm}(\mathbf{A}' - \mathbf{A}); & l_2 &= \|\overline{BB'}\| = \text{norm}(\mathbf{B}' - \mathbf{B}); \\ l_3 &= \|\overline{CC'}\| = \text{norm}(\mathbf{C}' - \mathbf{C}); & l_4 &= \|\overline{DD'}\| = \text{norm}(\mathbf{D}' - \mathbf{D}); \\ l_5 &= \|\overline{EE'}\| = \text{norm}(\mathbf{E}' - \mathbf{E}); & l_6 &= \|\overline{GG'}\| = \text{norm}(\mathbf{G}' - \mathbf{G}). \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, если изменение длины гидроцилиндров определяется формулами (7), то положение ПП является устойчивым.

4. СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОЦИЛИНДРАМИ ПРИ ПОСТУПАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ С НЕОПРЕДЕЛЕННОЙ ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ НА ПОСАДОЧНУЮ ПЛОЩАДКУ

В начальный момент времени, когда палуба корабля находится в горизонтальном состоянии, плоскости палубы и ПП параллельны друг другу, поэтому нагрузки, действующие на штоки поршней гидроцилиндров, равны. Следовательно, определение параметров гидроцилиндров и расчет параметров алгоритмов управления гидроцилиндрами является простой задачей. Однако при воздействии на корабль морских волн и других факторов окружающей среды палуба корабля начинает качаться. Чтобы сохранить устойчивое положение ПП, каждый гидроцилиндр должен изменить длину и угол наклона. Сила тяжести, действующая на поршни гидроцилиндров, также начинает изменяться. Расчет параметров гидроцилиндров по известным методам существенно усложняется, снижается точность расчетов. Эти причины являются основанием для развития в настоящей работе нового подхода к синтезу алгоритмов управления гидроцилиндрами. Изложим кратко суть этого подхода.

Кинематическое уравнение гидроцилиндра при вертикальном движении определяется по следующей формуле [19]:

$$F = (m + M) \frac{d^2 y}{dt^2} + Cy + r \frac{dy}{dt} + (m + M)g. \quad (8)$$

Здесь F – управляющая сила, определяющая поступательное движение поршня гидроцилиндра; m – масса штока поршня; M – масса объекта, перемещаемого поршнем гидроцилиндра; y – расстояние, на которое перемещается поршень гидроцилиндра; C – коэффициент эластичности гидравлического масла; r – коэффициент вязкого трения гидравлического масла; g – ускорение силы тяжести.

Синтез алгоритмов управления выполним на основе теории систем с переменной структурой [20]. Эта теория рекомендует выполнять синтез скользящего режима управления в пространстве переменных состояния. Обозначим переменные состояния через $x_1 = y$, $\dot{x}_1 = x_2$, тогда уравнение (8) можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{m+M}(F - rx_2 - Cx_1) - g. \end{cases} \quad (9)$$

Согласно теории систем с переменной структурой [20] для формирования управления может быть использована информация о величинах ошибки x_1 и ее производной x_2 . Обозначим через x_d желаемое положение поршня гидроцилиндра при перемещении объекта с массой M , тогда алгоритм управления системой определится из формулы

$$S = x_2 + k_1(x_1 - x_d). \quad (10)$$

В (10) k_1 – постоянная и ограниченная величина, выбираемая согласно [20] из условий обеспечения требуемых динамических свойств и устойчивости системы. Из (10) получим формулу для производной ошибки:

$$\dot{S} = \dot{x}_2 + k_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_d). \quad (11)$$

Система будет устойчивой, если $S\dot{S} < 0$ [20, 21]. Отсюда следует соотношение

$$\dot{S} = -\tilde{K} \operatorname{sign}(S). \quad (12)$$

В (12) через $\operatorname{sign}(\dots)$ обозначена знаковая функция, $\tilde{K}$ – неизвестный параметр.

Объединив (9), (11) и (12), получим уравнение для синтеза управляющего сигнала:

$$F = rx_2 + Cx_1 - k_1(m+M)(x_2 - \dot{x}_d) + (m+M)g - (m+M)\tilde{K} \operatorname{sign}(S). \quad (13)$$

Из уравнения (13) управляющий сигнал системы определяется с точностью до неизвестных параметров. Обозначим через $f(x)$ функцию, содержащую неизвестные параметры, то есть

$$f(x) = -rx_2 - Cx_1 + k_1(m+M)(x_2 - \dot{x}_d) - (m+M)g.$$

Введем неизвестный параметр $K = (m+M)\tilde{K}$, тогда уравнение (13) можно представить в следующем виде:

$$F = -f(x) - K \operatorname{sign}(S). \quad (14)$$

Итак, для обеспечения заданного качества процесса управления ПГС необходимо компенсировать неизвестные параметры и ошибки.

Из множества известных методов компенсации неизвестных параметров и ошибок системы выберем комбинацию метода искусственных нейронных

сетей (ИНС) и классического метода теории систем с переменной структурой [22]. Эту комбинацию назовем адаптивным скользящим режимом (АСР) управления. Структура ИНС для идентификации неизвестных параметров и ошибок системы представлена на рис. 2 и содержит три слоя: входной слой имеет один нейрон, скрытый слой состоит из трех нейронов и выходной слой включает один нейрон.

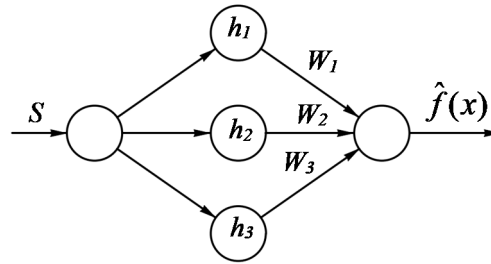


Рис. 2. Структура нейронной сети

Fig. 2. Neural network structure

Входной сигнал ИНС содержит неизвестный параметр k_1 и ошибку системы, обусловленную погрешностями в определении положения и скорости движения поршня гидроцилиндра, а выход ИНС представляет собой оценку $\hat{f}(x)$ функции, содержащей неизвестные параметры и ошибки. Значение выходного сигнала ИНС используется далее при выводе уравнения для определения управляющего сигнала и компенсации неизвестных параметров и ошибок.

Скрытый слой ИНС состоит из трех нейронов, содержащих нелинейные функции активации (ФА). Выберем в качестве ФА сигмовидную функцию [23]:

$$h_i(S) = \frac{1}{b_i(1 + e^{-S})}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (15)$$

Таким образом, выход ИНС определяется следующей формулой:

$$\hat{f}(x) = \sum_{i=1}^3 h_i(S) W_i. \quad (16)$$

Здесь W_i ($i = 1, 2, 3$) – весовые коэффициенты ИНС, обновляемые в процессе обучения ИНС. Обучение ИНС выполняется по известному алгоритму [23], который в нашем случае определяется формулой

$$\dot{W}_i = \gamma S h_i(S), \quad i = 1, 2, 3. \quad (17)$$

Здесь γ – положительный коэффициент, характеризующий скорость обучения ИНС [23]. Из (17) видно, что в формуле для обновления весов ИНС содержатся неизвестные параметры и ошибки. Следовательно, если неизвестные параметры и ошибки в системе отсутствуют, т. е. $S = 0$, то весовые коэффициенты ИНС не обновляются и поэтому ИНС не обучается. Для повышения скорости

обучения ИНС следует увеличить компенсирующий сигнал управления в (14) в K_1 раз ($K_1 > 0$), и тогда выражение (14) запишется в следующем виде:

$$F = -K_1 \hat{f}(x) - K \operatorname{sign}(S). \quad (18)$$

Для компенсации неизвестных параметров и ошибок дополним (18) слабым, которое пропорционально составляющей S , заданной формулой (10). Тогда уравнение для вычисления управляющего сигнала определяется формулой

$$F = -K_2 S - K_1 \hat{f}(x) - K \operatorname{sign}(S), \quad K_2 > 0. \quad (19)$$

Из (19) следует, что желаемая точность управления гидроцилиндрами ПГС обеспечивается как варьированием параметров ИНС, так и изменением коэффициентов K , K_1 , K_2 . Такой режим управления ПГС назван выше АСР.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ МАТЛАВ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

5.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ГИДРОЦИЛИНДРА С ОБЪЕКТОМ НЕИЗВЕСТНОЙ МАССЫ

Моделирование выполнено на виртуальной физической модели гидроцилиндра, созданной на основе пакета прикладных программ (ППП) MATLAB SIMULINK. Модель виртуального гидроцилиндра представлена на рис. 3.

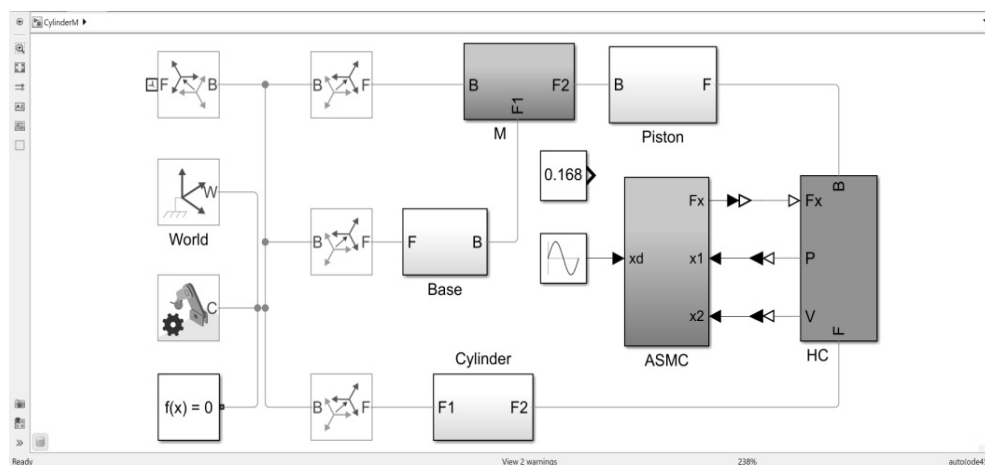


Рис. 3. Физическая модель виртуального гидроцилиндра и адаптивного регулятора

Fig. 3. Physical model of a virtual hydraulic cylinder and adaptive controller

На рис. 3 и 9 используются обозначения и символика, рекомендуемая ППП MATLAB SIMULINK: World – фиксированная система координат, привязанная к Земле; В (Base) – коннектор к предыдущему блоку; F (Follow), F1, F2 – разъемы для соединения со следующими блоками; Base – фиксированное основание с прикрепленным гидроцилиндром; Piston – поршень; ASMC

(Adaptive Sliding Mode Control – адаптивный скользящий регулятор); НС (Hydraulic Cylinder – гидроцилиндр: соединение поршня и цилиндра); Р (Position – расположение); V (Velocity – скорость); F_x – сигнал управления, определяемый из (19). Синусоида и цифры на рис. 7 и 8 иллюстрируют задающие сигналы: например, число 0,168 определяет задающий сигнал на входе, равный 168 мм. Заметим, что в символике ППП MATLAB SIMULINK в десятичной дроби дробная часть числа отделяется точкой, однако в тексте статьи будем придерживаться отечественной традиции и отделять запятой дробную часть числа.

Гидроцилиндр несет на себе объект массой $M = 200$ кг (предполагается, что масса объекта M неизвестна), масса штока поршня ГЦ $m = 0,3$ кг. Моделирование выполняется на основе формул (10), (15), (16), (17) и (19) для значений параметров $k_1 = 4,2$; $K = 17$; $K_1 = 150$; $K_2 = 10$; $\gamma = 0,01$; $b_1 = b_2 = b_3 = 2$. Поршень гидроцилиндра перемещает объект с массой M (далее – объект M) вертикально на расстояние $\Delta y = 168$ мм.

На рис. 4–8 представлены результаты моделирования гидроцилиндра в ППП MATLAB. Рисунок 4 показывает результат моделирования гидроцилиндра – его отклик l при перемещении объекта M на заданное расстояние $l_d = 168$ мм. Рисунки 5 и 6 представляют результаты моделирования скорости движения гидроцилиндра с объектом M и силу, действующую на объект M . Рисунки 7 и 8 демонстрируют результаты моделирования движения поршня гидроцилиндра при воздействии на него синусоидального сигнала с амплитудой в диапазоне от -168 мм до 168 мм и угловой частотой колебаний 30 град/с.

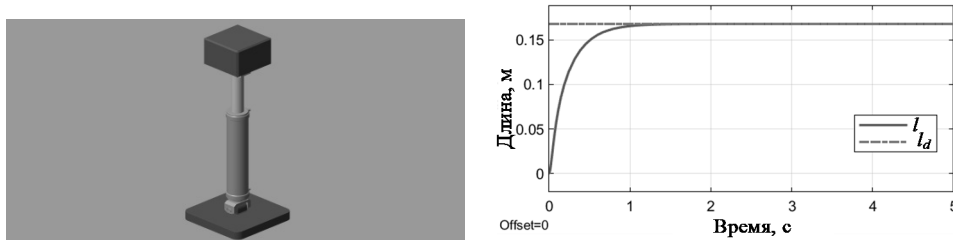


Рис. 4. Отклик гидроцилиндра при его перемещении в заданное состояние $l_d = 168$ мм

Fig. 4. Response of the hydraulic cylinder when it moves to a given state $l_d = 168$ mm

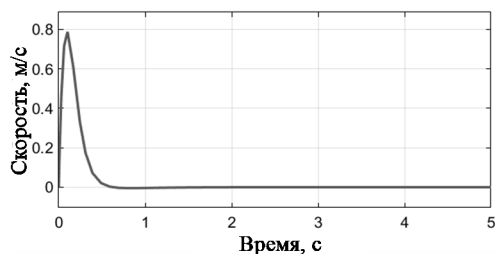


Рис. 5. Скорость перемещения объекта M

Fig. 5. The velocity of the object M

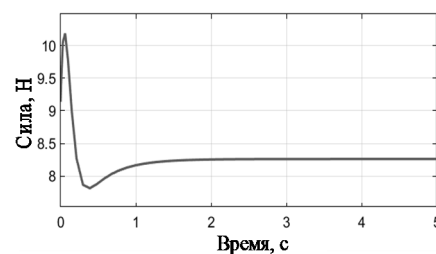


Рис. 6. Сила, действующая на объект M

Fig. 6. Force acting on object M

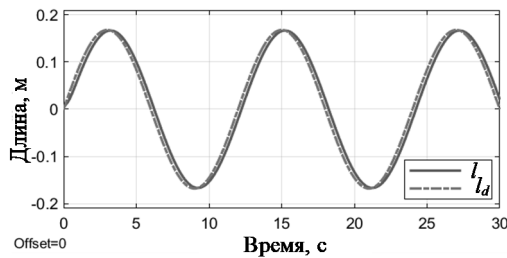


Рис. 7. Изменение положения объекта M при синусоидальном входном сигнале

Fig. 7. Change the position of object M with a sinusoidal input signal

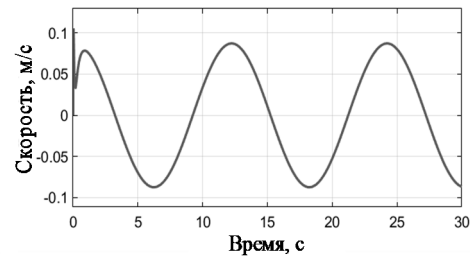


Рис. 8. Изменение скорости объекта M при синусоидальном входном сигнале

Fig. 8. Change the velocity of object M with a sinusoidal input signal

Из рис. 4–8 следует, что система стабилизируется в течение интервала времени от 1,5 до 2 с. Если входной сигнал представляет собой синусоидальный сигнал, то выходной сигнал системы с высокой точностью повторяет входной сигнал.

Таким образом, результаты моделирования гидроцилиндра показывают эффективность предлагаемых моделей и синтезированных алгоритмов управления гидроцилиндра ПГС при воздействии на гидроцилиндр объекта с неизвестной массой. Результаты моделирования представлены для одного гидроцилиндра, но такой же результат получен и при управлении шестью гидроцилиндрами ПГС для стабилизации ПП на палубе корабля.

5.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАТФОРМЫ ГЬЮ – СТЮАРТА И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Моделирование выполнено на виртуальной физической модели ПГС, созданной в ППП MATLAB SIMULINK и представленной на рис. 9. Обозначения на этом рисунке имеют тот же смысл, что и на рис. 3. Виртуальная ПГС состоит из ПП с объектом, общая масса которых равна 200 кг (при моделировании предполагается, что масса ПП с объектом неизвестна), шести гидроцилиндров, которые имеют те же параметры, что и в разделе 5.1, и шести регуляторов АСР, т. е. каждый гидроцилиндр оснащен регулятором АСР.

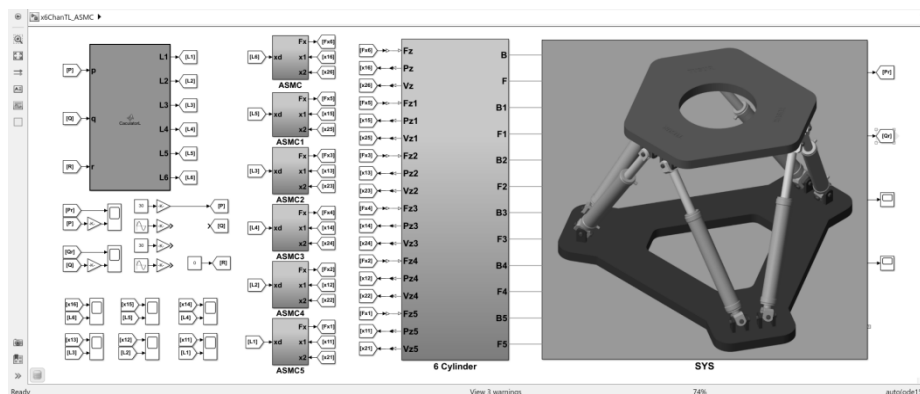


Рис. 9. Физическая модель платформы Гью – Стюарта с адаптивными регуляторами

Fig. 9. Physical model of the Hugh – Stewart platform with adaptive controllers

Параметры модели следующие: начальная длина гидроцилиндров равна 0,665 м; начальная высота ПП равна 0,5525 м; начальные координаты точек – оснований гидроцилиндров – заданы в таблице.

На рис. 10–12 (где ГЦ – гидроцилиндры) представлены результаты моделирования ПГС в ППП MATLAB. Рисунок 10 показывает результаты моделирования ПГС – отклик ПГС при повороте палубы корабля на угол 30° вокруг оси O_Bx_B (при вращении корабля вокруг оси O_Bx_B ПП вращается вокруг оси O_Ax_A в противоположном направлении, это замечание необходимо учитывать при анализе других рисунков). Рисунок 11 показывает результаты моделирования ПГС – положение ПГС при повороте палубы корабля на угол 30° вокруг оси O_By_B . На рис. 12 представлен результат моделирования ПГС – отклик ПГС на колебания палубы вокруг оси O_Bx_B : амплитуда колебаний $\pm 30^\circ$, угловая частота колебаний 2 рад/с. Этот же рисунок показывает положение ПГС при указанных колебаниях палубы корабля.

Исходные данные для модели платформы Гью – Стюарта

Initial data for the Hugh – Stewart platform model

Координаты							
ГЦ (низ)	x_B	y_B	z_B	ГЦ (верх)	x_A	y_A	z_A
A'	0,3054	-0,4229	0	A	0,3160	-0,0530	0
B'	0,3054	0,4229	0	B	0,3160	0,0530	0
C'	0,2136	0,4759	0	C	-0,1121	0,3002	0
D'	-0,5190	0,0530	0	D	-0,2039	0,2472	0
E'	-0,5190	-0,0530	0	E	-0,2039	-0,2472	0
G'	0,2136	-0,4759	0	G	-0,1121	-0,3002	0

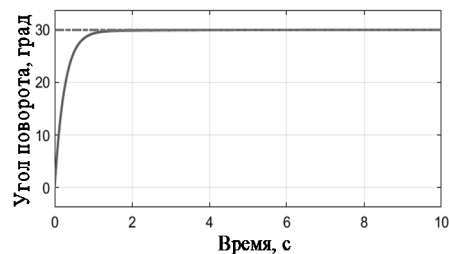
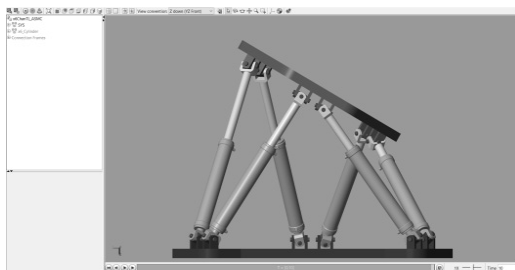


Рис. 10. Положение платформы Гью – Стюарта после поворота на угол 30° вокруг оси O_Ax_A

Fig. 10. Position of the Hugh – Stewart platform after rotating to an angle of 30° around the O_Ax_A axis

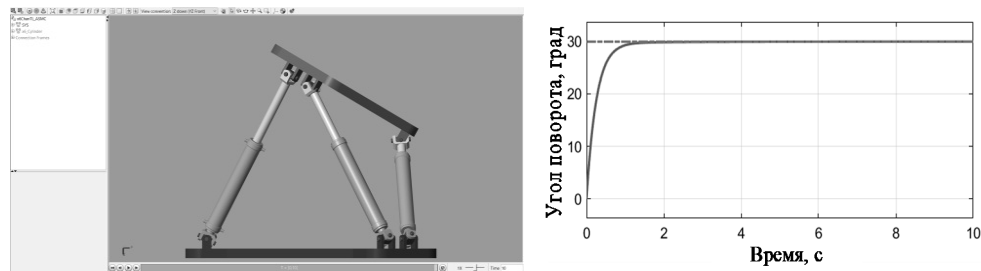


Рис. 11. Положение платформы Гю – Стьюарта после поворота на угол 30° вокруг оси $O_A y_A$

Fig. 11. Position of the Hugh – Stewart platform after rotating to an angle of 30° around the $O_A y_A$ axis

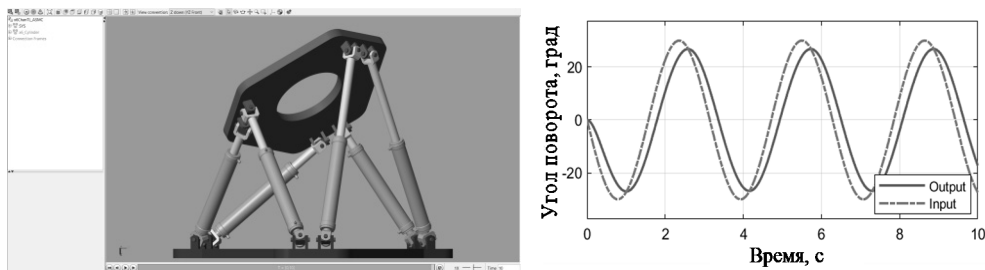


Рис. 12. Положение платформы Гю – Стьюарта при колебаниях палубы вокруг оси $O_A x_A$ с амплитудой $\pm 30^\circ$, угловой частотой колебаний 2 рад/с

Fig. 12. Position of the Hugh – Stewart platform when the deck vibrates around the $O_A x_A$ axis with amplitude $\pm 30^\circ$, oscillation frequency 2 rad/s

В настоящем исследовании выполнено, но не представлено в виде графиков моделирование ПГС при колебаниях палубы вокруг других координатных осей: оси $O_B y_B$ с амплитудой колебаний $\pm 30^\circ$ и угловой частотой колебаний 2 рад/с; при колебаниях палубы одновременно вокруг двух осей $O_B x_B$ и $O_B y_B$. В указанном исследовании наблюдаются те же закономерности, что и на рис. 10–12. Таким образом, моделирование ПГС доказывает эффективность предлагаемых моделей и алгоритмов управления ПГС при исследованных значениях параметров моделей и алгоритмов: нагрузке 200 кг, колебаниях палубы корабля по произвольным координатным осям с амплитудой $\pm 30^\circ$ и угловой частотой 2 рад/с и других значениях параметров, представленных в таблице. При моделировании предполагается, что алгоритмы управления ГЦ ПГС функционируют при неизвестной и непредсказуемо изменяющейся нагрузке на ПП, размещенной на ПГС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе сформулированы и решены задачи, возникающие при создании систем автоматической стабилизации, расположенных на мобильных объектах. Платформа Гю – Стьюарта – одно из устройств, широко используемых в САС. В статье изложены результаты математического моделирования

ПГС, находящейся на мобильном объекте, в обстановке внешних возмущений. Роль мобильного объекта выполняет надводный корабль, постоянно находящийся в условиях непредсказуемых водных возмущений. ПГС расположена на палубе корабля и состоит из шести гидравлических цилиндров, одни концы которых соединены непосредственно с палубой корабля, а другие концы гидроцилиндров связаны с платформой для размещения посадочной площадки для вертолетов и БПЛА. Стабилизация ПГС с ПП обеспечивается изменением длины шести гидроцилиндров по определенным алгоритмам для обеспечения устойчивости САС. В статье выполнено построение кинематической модели ПГС, обоснован выбор скользящих режимов при реализации алгоритмов управления гидроцилиндрами для стабилизации ПГС и предложена адаптация этих режимов на основе ИНС. ИНС обеспечивают идентификацию неизвестных возмущений. Результаты моделирования в ППП MATLAB SIMULINK доказывают эффективность предложенных моделей и алгоритмов управления ПГС для создания систем автоматической стабилизации оборудования, находящегося на мобильных объектах, в обстановке неизвестных внешних возмущений. Для автоматической посадки вертолетов и БПЛА на подобные мобильные ПП могут быть применены алгоритмы и программы, предложенные и исследованные в [22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буй В.Т., Юркевич В.Д. Резонансный ПИ-регулятор для судовой электрогидравлической стабилизированной платформы // Доклады ТУСУР. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 81–87. – DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-2-81-87.
2. Буй Т.В. Математическая модель стабилизированной платформы с электрогидроприводом на корабле // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 3 (91). – С. 7–18. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-7-18.
3. Dynamics and modeling of ocean waves / ed. by G.J. Komen, L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, P.A.E.M. Janssen. – Cambridge University Press, 1996. – 554 p.
4. A review of short-term prediction techniques for ship motions in seaway / L.M. Huang, W.Y. Duan, Y. Han, Y.S. Chen // Journal of Ship Mechanics. – 2014. – Vol. 18 (12). – P. 1534–1542.
5. Zhao X., Xu R., Kwan C. Ship-motion prediction: algorithms and simulation results // 2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Montreal, QC, Canada. – IEEE, 2004. – Vol. 5. – P. V-125. – DOI: 10.1109/ICASSP.2004.1327063.
6. Devi N.R., Banik A.K., Barik M. Dynamic response, and control nonlinear coupled roll-pitch (2DOF) motion of the ship under harmonic waves // International Conference on Advances in Construction Materials and Structures (ACMS-2018). – IIT Roorkee, Uttarakhand, India, 2018.
7. Gu J.Y. Nonlinear rolling motion of ship in random beam seas // International Conference on Advances in Construction Materials and Structures (ACMS-2018). – IIT Roorkee, Uttarakhand, India, 2018.
8. Active disturbance rejection control for gun control of unmanned turret / L. Ye, Y. Xia, M. Fu, C. Li // Control Theory and Applications. – 2014. – Vol. 31, N 11. – P. 1580–1588.
9. Habib A.A.A.A., Ali A.E.M., Nawar M.A.M. Simple computational platform of ship stability for engineering education // 3rd IUGRC International Undergraduate Research Conference, Military Technical College. – Cairo, Egypt, 2018.
10. Серегин В.В. Прикладная теория и принципы построения гироскопических систем. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. – 78 с.
11. Гупалов В.И., Подгорная Л.Н., Ткаченко А.Н. Стабилизированные платформы. – СПб.: ЛЭТИ, 2012. – 53 с.

12. *Hilkert J.M.* Inertially stabilized platform technology // *IEEE Control Systems Magazine*. – 2008. – Vol. 26 (1). – P. 26–46.
13. *Пельпор Д.С.* Гироскопические системы. Теория гироскопов и гиросtabilизаторов. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1986. – 423 с.
14. Development of a parallel-series stabilized platform system / L.L. Wang, J.Z. Xiao, H.R. Wang, X.L. Liu, Z. Gao // *Applied Mechanics and Materials*. – 2013. – Vol. 319. – P. 414–418.
15. *Stewart D.* A platform with six degrees of freedom // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. London. – 1965. – Vol. 180 (1). – P. 371–386. – DOI: 10.1243/PIME_PROC_1965_180_029_02.
16. *Зуев С.М.* Стабилизация положения равновесия платформы Стьюарта с тремя степенями свободы // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1, Математика. Механика. Астрономия*. – 2013. – № 4. – С. 84–92.
17. *Лопатин А.А.* Разбор механизмов с шестью степенями свободы и практического применения на примере платформы Гью-Стьюарта // *Современные проблемы теории машин*. – 2020. – № 9. – С. 33–36. – DOI: 10.26160/2307-342X-2020-9-33-36.
18. Платформа Гью – Стьюарта. – URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1599143> (accessed: 01.03.2024).
19. *Артоболевский И.И.* Теория механизмов и машин. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1988. – 640 с.
20. *Емельянов С.В.* Системы автоматического управления с переменной структурой. – М.: Наука, 1967. – 336 с.
21. *Dorf R.C., Bishop R.H.* Modern control systems. – 12th ed. – Prentice Hall: Pearson, 2011. – 1110 p.
22. *Тран В.Т., Корилов А.М.* Детектирование посадочной площадки и автоматическая посадка беспилотного летательного аппарата по ее изображению // *Доклады ТУСУР*. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 72–80. – DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-2-72-80.
23. *Галушкин А.И.* Нейронные сети: основы теории. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 496 с.

Корилов Анатолий Михайлович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, академик МАН ВШ и МАИ, профессор кафедры автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), заслуженный профессор ТУСУР. Основное направление научных исследований – автоматизация и оптимизация систем обработки информации и управления. Имеет более 300 научных публикаций, в том числе 12 монографий. E-mail: anatolii.m.korikov@tusur.ru

Тран Ван Трук, в 2006 г. окончил Военно-морскую академию в Нячанге. В 2016 г. получил степень M.S. (магистра) по специальности «Управление и автоматизация» в Военно-технической академии, Ханой, Вьетнам. С 2017 по 2020 г. участвовал в исследованиях Военно-морской академии Вьетнама. С 1 октября 2021 г. аспирант кафедры АСУ ТУСУР. Основное направление научных исследований – автоматизированное и автоматическое управление мобильными системами, в том числе беспилотными летательными аппаратами. E-mail: att82glass@gmail.com

Korikov Anatoly M., Doctor of Engineering Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, professor at the Automated Control Systems department in Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR). The main direction of his scientific research is automation and optimization of information processing and control systems. He has more than 300 scientific publications, including 12 monographs. E-mail: anatolii.m.korikov@tusur.ru

Van Truc Tran, in 2006 graduated from the Naval Academy in Nha Trang. Received M.S. (Master) degree in Control and Automation from the Military Technical Academy, Hanoi,

Vietnam in 2016. From 2017 to 2020, participated in research at the Vietnam Naval Academy. From 10/01/2021 is PhD candidate at the Department of Automated Control Systems TUSUR. The main direction of his scientific research includes automation and automatic control of mobile systems, including unmanned aerial vehicles. E-mail: att82glass@gmail.com

DOI: 10.17212/2782-2001-2024-1-21-40

***Modeling of the Hugh – Stewart platform located on a mobile object
in an environment of external disturbances****

A.M. KORIKOV^a, V.T. TRAN^b

634050, Tomsk, 40 Lenin Avenue, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

^a anatolii.m.korikov@tusur.ru

^b att82glass@gmail.com

Abstract

Problems that arise when creating automatic stabilization systems located on mobile objects are being solved. The advantages and disadvantages of known types of automatic stabilization systems are noted. The Hugh – Stewart platform is one of the devices used in these systems. The article presents the results of mathematical modeling of the Hugh – Stewart platform located on a mobile object, in an environment of external disturbances. This situation is typical for a platform located on a ship, constantly exposed to unpredictable disturbances in the water environment. The Hugh – Stewart platform consists of six hydraulic cylinders, some ends of which are connected directly to the deck of the ship, and the other ends of the hydraulic cylinders are connected to the platform for installing equipment, instruments, devices, whose position in space must be stable. Stabilization of the Hugh-Stewart platform is ensured by changing the length of six hydraulic cylinders according to certain algorithms to ensure the stability of the automatic stabilization system. Mathematical modeling of the Hugh – Stewart platform is complicated not only by the fact that the rotational interaction of six interconnected solid bodies (hydraulic cylinders) platform components – must be taken into account, but also by the need to take into account the influence of unknown disturbances on the platform (when modeling the Hugh – Stewart platform located on a ship, it is necessary to take into account the influence of unpredictable water (sea, ocean) disturbances). The article constructs a kinematic model of the Hugh – Stewart platform, substantiates the choice of sliding modes when implementing hydraulic cylinder control algorithms to stabilize the platform, and proposes adaptation of these modes based on neural networks to take into account the influence of unknown disturbances. Simulation results in the MATLAB software environment prove the effectiveness of the proposed models and control algorithms of the Hugh – Stewart platform.

Keywords: automatic stabilization system, mobile object, Hugh – Stewart platform, mathematical modeling, external disturbances, hydraulic cylinder, stability, kinematic model, sliding mode, neural network, control

REFERENCES

1. Bui V.T., Yurkevich V.D. Rezonansnyi PI-regulyator dlya sudovoi elektrogidravlicheskoj stabilizirovannoi platformy [Resonant PI controller for shipboard electrohydraulic stabilized platform]. *Doklady TUSUR = Proceedings of TUSUR University*, 2023, vol. 26, no. 2, pp. 81–87. DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-2-81-87.

* Received 21 December 2023.

2. Bui T.V. Matematicheskaya model' stabilizirovannoi platformy s elektrogidroprivodom na korable [A mathematical model of a stabilized platform with an electro-hydraulic drive on a ship]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 3 (91), pp. 7–18. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-7-18.
3. Komen G.J., Cavaleri L., Donelan M., Hasselmann K., Hasselmann S., Janssen P.A.E.M., eds. *Dynamics and modeling of ocean waves*. Cambridge University Press, 1996. 554 p.
4. Huang L.M., Duan W.Y., Han Y., Chen Y.S. A review of short-term prediction techniques for ship motions in seaway. *Journal of Ship Mechanics*, 2014, vol. 18 (12), pp. 1534–1542.
5. Zhao X., Xu R., Kwan C. Ship-motion prediction: algorithms and simulation results. *2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Montreal, QC, Canada, 2004, vol. 5, pp. V-125. DOI: 10.1109/ICASSP.2004.1327063.
6. Devi N.R., Banik A.K., Barik M. Dynamic response, and control nonlinear coupled roll-pitch (2 DOF) motion of the ship under harmonic waves. *International Conference on Advances in Construction Materials and structures (ACMS-2018)*, IIT Roorkee, Uttarakhand, India, 2018.
7. Gu J.Y. Nonlinear rolling motion of ship in random beam seas. *International Conference on Advances in Construction Materials and Structures (ACMS-2018)*, IIT Roorkee, Uttarakhand, India, 2018.
8. Ye L., Xia Y., Fu M., Li C. Active disturbance rejection control for gun control of unmanned turret. *Control Theory and Applications*, 2014, vol. 31, no. 11, pp. 1580–1588.
9. Habib A.A.A.A., Ali A.E.M., Nawar M.A.M. Simple computational platform of ship stability for engineering education. *3rd IUGRC International Undergraduate Research Conference*, Military Technical College, Cairo, Egypt, 2018.
10. Seregin V.V. *Prikladnaya teoriya i printsipy postroeniya giroskopicheskikh sistem* [Applied theory and principles of constructing gyroscopic systems]. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2007. 78 p.
11. Gupalov V.I., Podgornaya L.N., Tkachenko A.N. *Stabilizirovannye platformy* [Stabilized platforms]. St. Petersburg, LETI Publ., 2012. 53 p.
12. Hilkert J.M. Inertially stabilized platform technology. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008, vol. 26 (1), pp. 26–46.
13. Pel'por D.S. *Giroskopicheskie sistemy. Teoriya gidroskopov i girostabilizatorov* [Gyroscopic systems. Theory of gyroscopes and girostabilizers]. 2nd ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986. 423 p.
14. Wang L.L., Xiao J.Z., Wang H.R., Liu X.L., Gao Z. Development of a parallel-series stabilized platform system. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 319, pp. 414–418.
15. Stewart D. A platform with six degrees of freedom. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. London, 1965, vol. 180 (1), pp. 371–386. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1965_180_029_02.
16. Zuev S.M. Stabilizatsiya polozheniya ravnovesiya platformy Styuarta s tremya stepenyami svobody [Stabilization of the equilibrium Stewart platform with three degrees of freedom]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 1, Matematika. Mekhanika. Astronomiya = Vestnik of Saint Petersburg University. Series 1, Mathematics. Mechanics. Astronomy*, 2013, no. 4, pp. 84–92.
17. Lopatin A.A. Razbor mekhanizmov s shest'yu stepenyami svobody i prakticheskogo primeneniya na primere platformy G'yu – Styuarta [Parsing of mechanisms with six degrees of freedom and practical application on the example of the Gew – Stewart platform]. *Sovremennye problemy teorii mashin = Modern Problems of the Theory of Machines*, 2020, no. 9, pp. 33–36. DOI: 10.26160/2307-342X-2020-9-33-36.
18. *Platforma G'yu-Styuarta* [Hugh-Stewart Platform]. Available at: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1599143> (accessed 01.03.2024).
19. Artobolevskii I.I. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. 4th rev. ed. Moscow, Nauka Publ., 1988. 640 p.
20. Emel'yanov S.V. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya s peremennoi strukturoi* [Automatic control systems with variable structure]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 336 p.
21. Dorf R.C., Bishop R.H. *Modern control systems*. 12th ed. Prentice Hall, Pearson, 2011. 1110 p.

22. Tran V.T., Korikov A.M. Detektirovanie posadochnoi ploshchadki i avtomaticheskaya posadka bespilotnogo letatel'nogo apparata po ee izobrazheniyu [Detection of the landing site and development of algorithms for automatic landing of an unmanned aerial vehicle]. *Doklady TUSUR = Proceedings of TUSUR University*, 2023, vol. 26, no. 2, pp. 72–80. DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-2-72-80.

23. Galushkin A.I. *Neironnye seti: osnovy teorii* [Neural networks: basic theory]. Moscow, Hotline – Telecom Publ., 2010. 496 p.

Для цитирования:

Кориков А.М., Тран В.Т. Моделирование платформы Гью – Стюарта, размещенной на мобильном объекте, в обстановке внешних возмущений // Системы анализа и обработки данных. – 2024. – № 1 (93). – С. 21–40. – DOI: 10.17212/2782-2001-2024-1-21-40.

For citation:

Korikov A.M., Tran V.T. Modelirovanie platformy G'yu – Styuarta, razmeshchennoi na mobil'nom ob'ekte, v obstanovke vneshnikh vozmushchenii [Modeling of the Hugh – Stewart platform located on a mobile object in an environment of external disturbances]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2024, no. 1 (93), pp. 21–40. DOI: 10.17212/2782-2001-2024-1-21-40.