

УДК 519.873

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-7-18

## Математическая модель стабилизированной платформы с электрогидроприводом на корабле\*

Т.В. БУЙ

630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

[tamlpt@gmail.com](mailto:tamlpt@gmail.com)

Стабилизированные платформы применяются на всех типах движущихся транспортных средств, от спутников до подводных лодок, и даже используются на некоторых портативных и наземных устройствах. Например, стабилизированная платформа на корабле используется для размещения навигационного оборудования и антенн систем радиолокационной связи, что позволяет улучшить эффективность работы этого оборудования в условиях воздействий волновых возмущений. Существуют различные кинематические схемы построения корабельных стабилизированных платформ. В частности, применяются последовательные стабилизированные платформы и параллельные стабилизированные платформы. В практических приложениях более широкое применение нашли последовательные стабилизированные платформы. В настоящей работе рассматривается математическая модель корабельной стабилизированной платформы с двумя степенями свободы, в которой управление угловой ориентацией платформы осуществляется с помощью электрогидроприводов. Применение электрогидравлических приводов позволяет обеспечить формирование требуемой величины силового воздействия для компенсации возмущений от волновых колебаний палубы корабля. С целью получения соотношений для описания взаимосвязи угловых перемещений элементов кинематической схемы платформы с величиной перемещения штока гидроцилиндра в настоящей работе привлекается аппарат комплексных чисел. Рассмотрена математическая модель электрогидропривода с учетом динамики перемещения электромеханизма золотникового сервоклапана, величин расходов и давлений рабочей жидкости в полостях гидроцилиндра. Рассмотрена линеаризованная математическая модель электрогидропривода и получены оценки для параметров математической модели при заданных массогабаритных характеристиках электрогидропривода. Данная математическая модель может быть использована при синтезе системы управления электрогидроприводом для обеспечения заданной угловой ориентации платформы при действии волновых возмущений.

**Ключевые слова:** стабилизированная платформа, кинематическая схема, угловая стабилизация, стабилизация крена, стабилизация тангажа, волновые возмущения, электрогидравлический привод, математическая модель электрогидропривода, линеаризованная математическая модель, параметры модели электрогидропривода

---

\* Статья получена 19 февраля 2023 г.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе рассматривается задача построения математической стабилизированной платформы, которая установлена на палубе водного судна. Платформа используется для размещения навигационного оборудования и радиолокационных антенн систем связи, для эффективной работы которых требуется обеспечить стабилизацию положения платформы в пространстве в условиях волновых возмущений водной среды [1–3]. С целью уменьшения влияния данных возмущений навигационное оборудование размещают на специальной стабилизируемой платформе [4–7]. В частности, применяются последовательные стабилизированные платформы и параллельные стабилизированные платформы [8]. В практических приложениях более широкое применение нашли последовательные стабилизированные платформы [9–13].

Существует множество примеров использования стабилизированных платформ, например, в гироскопических навигационных системах [14–17]. Эффективность и точность угловой стабилизации платформы достигается с помощью системы автоматического управления, для проектирования которой требуется математическая модель платформы. Вид математической модели стабилизированной платформы зависит от ее конструкции, количества степеней свободы и типа привода [18–21]. В работе рассмотрена математическая модель стабилизированной платформы с электрогидроприводом.

## 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ

В этой части рассматривается математическая модель стабилизированной платформы, размещенной на корабле с двумя степенями свободы, кинематическая схема которой показана на рис. 1.

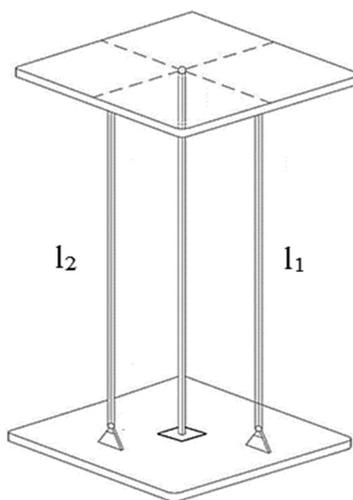


Рис. 1. Кинематическая схема стабилизированной платформы на корабле

Fig. 1. Kinematic diagram of the stabilized platform on the ship

Стабилизированная платформа связана с палубой через два привода и цилиндрическую стойку. Обычно два привода расположены под углом  $90^\circ$  и связаны со стабилизированной платформой шаровыми шарнирами.

Платформа с двумя степенями свободы может вращаться вокруг двух осей (тангаж и крен), как это показано на рис. 2, *а* и *б*. Управление угловым положением платформы осуществляется изменением длин звеньев  $l_1, l_2$ .

В настоящей работе обсуждается математическая модель стабилизированной платформы на корабле, угловое перемещение которой осуществляется с помощью электрогидравлического сервопривода. В качестве примера рассматривается схема стабилизированной платформы на корабле по углу тангажа, которая показана на рис. 2, *а*, где  $h_0, a_1, a_2, l_1$  есть звенья обсуждаемой кинематической схемы; на рис. 2, *б* рассматривается схема стабилизированной платформы на корабле по углу крена с параметрами  $h_0, b_1, b_2, l_2$ . Звено  $a_2$  на этой схеме представляет платформу, а изменение угла наклона  $\beta_p$  данного звена относительно палубы корабля достигается путем изменения длины звена  $l_1$  с помощью электрогидравлического сервопривода.

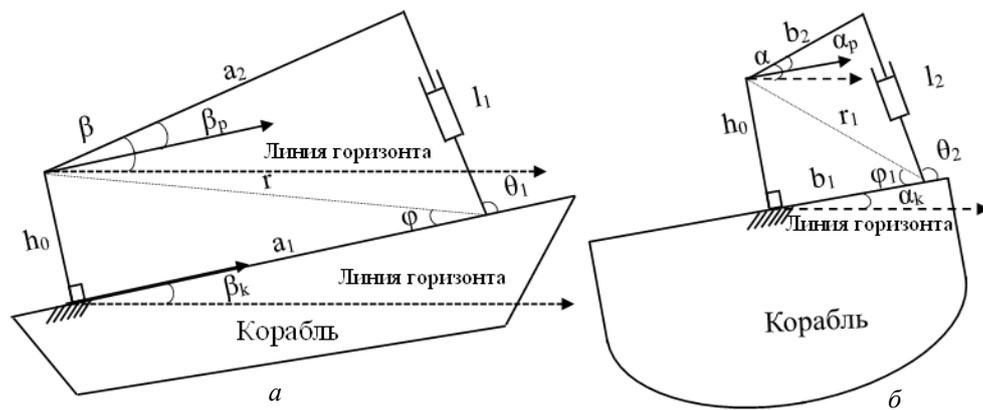


Рис. 2. Кинематическая схема платформы на корабле по углу тангажа (*а*); кинематическая схема платформы на корабле по углу крена (*б*)

Fig. 2. Kinematic diagram of the platform on the ship by pitch angle (*a*); kinematic diagram of the platform on the ship by roll angle (*b*)

Представляя звенья на рис. 2, *а* в виде комплексных чисел [13] для данной замкнутой кинематической цепи, получим следующее уравнение:

$$h_0i + a_2e^{i\beta_p} - l_1e^{i\theta_1} - a_1 = 0,$$

из которого следует

$$l_1e^{i\theta_1} = -a_1 + h_0i + a_2e^{i\beta_p}. \tag{1}$$

Комплексное сопряжение для уравнения (1) имеет вид

$$l_1e^{-i\theta_1} = -a_1 - h_0i + a_2e^{-i\beta_p}. \tag{2}$$

В результате перемножения выражений (1) и (2) получим

$$l_1^2 = h_0^2 + a_2^2 + a_1^2 - a_2 a_1 \left( e^{i\beta_p} + e^{-i\beta_p} \right) - h_0 a_2 i \left( e^{i\beta_p} - e^{-i\beta_p} \right). \quad (3)$$

Обозначим

$$k_1 = e^{i\beta_p} + e^{-i\beta_p}, \quad k_2 = e^{i\beta_p} - e^{-i\beta_p}.$$

Тогда выражение (3) можно представить в виде

$$l_1^2 = h_0^2 + a_2^2 + a_1^2 - a_2 a_1 k_1 - h_0 a_2 k_2 i. \quad (4)$$

Также отметим, что для выражений  $k_1$  и  $k_2$  справедливы соотношения:

$$\begin{cases} k_1 = e^{i\beta_p} + e^{-i\beta_p} = \cos \beta_p + i \sin \beta_p + \cos \beta_p - i \sin \beta_p = 2 \cos \beta_p, \\ k_2 = e^{i\beta_p} - e^{-i\beta_p} = \cos \beta_p + i \sin \beta_p - \cos \beta_p + i \sin \beta_p = 2i \sin \beta_p. \end{cases} \quad (5)$$

Подставляя соотношения (5) для  $k_1$  и  $k_2$  в уравнение (4), получим уравнение, показывающее зависимость между длиной звена  $l_1$  и углом наклона платформы  $\beta_p$  относительно палубы корабля в продольной плоскости:

$$l_1^2 = h_0^2 + a_2^2 + a_1^2 - 2a_2 a_1 \cos \beta_p + 2h_0 a_2 \sin \beta_p. \quad (6)$$

Из рис. 2, а следует, что  $h_0 = r \sin \varphi$  и  $a_1 = r \cos \varphi$ . Подставляя данные выражения для  $h_0$  и  $a_1$  в уравнение (6), получим

$$\frac{l_1^2 - h_0^2 - a_2^2 - a_1^2}{2a_2 r} = \sin \varphi \sin \beta_p - \cos \varphi \cos \beta_p. \quad (7)$$

Здесь  $r = \sqrt{h_0^2 + a_1^2}$ . Обозначим  $k_3 = \frac{a_2^2 + r^2 - l_1^2}{2ra_2}$  и преобразуем уравнение (7):

$$\cos(\varphi + \beta_p) = k_3, \quad \sin(\varphi + \beta_p) = \sqrt{1 - k_3^2}. \quad (8)$$

Из выражения (8) получим

$$\tan(\varphi + \beta_p) = \frac{\sqrt{1 - k_3^2}}{k_3}, \quad (9)$$

где в соответствии с рис. 2, а справедливо условие  $0 \leq (\varphi + \beta_p) \leq \pi$ . Из выражения (9) следует

$$\beta_p = -\varphi + \arctan \frac{\sqrt{1 - k_3^2}}{k_3}, \quad (10)$$

где  $k_3 = k_3(l_1)$ .

Представим длину звена  $l_1$  в виде  $l_1 = l_{01} + \Delta l_1$ , где  $\Delta l_1$  – величина перемещения штока в цилиндре электрогидравлического сервопривода, а величина  $l_{01}$  соответствует выполнению требования  $\beta_p = 0$ . Тогда из условия  $\beta_p = 0$  в выражении (10) следует

$$\varphi = \arctan \frac{\sqrt{1 - k_3^2(l_{01})}}{k_3(l_{01})} = f(k_3(l_{01})). \quad (11)$$

Подставляя выражение (11) в уравнение (10), получим

$$\beta_p = -\arctan \frac{\sqrt{1 - k_3^2(l_{01})}}{k_3(l_{01})} + \arctan \frac{\sqrt{1 - k_3^2(l_1)}}{k_3(l_1)}. \quad (12)$$

Обозначим  $f(k_3(l_1)) = \arctan \frac{\sqrt{1 - k_3^2(l_1)}}{k_3(l_1)}$  и выполним линеаризацию в окрестности точки  $l_{01}$  уравнения (12) на основе его разложения в ряд Тейлора [21]. Получим

$$\beta_p = -f(k_3(l_{01})) + f(k_3(l_{01})) + \frac{\partial f}{\partial k_3} \frac{\partial k_3}{\partial l_{01}} \Delta l = \frac{\partial f}{\partial k_3} \frac{\partial k_3}{\partial l_{01}} \Delta l_1. \quad (13)$$

Вычисляя частные производные

$$\frac{\partial f}{\partial k_3} = \frac{1}{\sqrt{1 - k_3^2}}, \quad \frac{\partial k_3}{\partial l_{01}} = \frac{l_{01}}{r_1 a_2},$$

получим

$$\frac{\partial f}{\partial k_3} \frac{\partial k_3}{\partial l_{01}} = \frac{1}{\sqrt{1 - k_3^2}} \frac{l_{01}}{r_1 a_2} = \frac{2l_{01}}{\sqrt{4r_1^2 a_2^2 - c_1^2}}, \quad (14)$$

где  $c_1 = a_2^2 + r^2 - l_{01}^2$ . Затем, подставляя выражение (14) в уравнение (13), получим зависимость между углом наклона платформы  $\beta_p$  и смещением поршня  $\Delta l_1$ :

$$\beta_p = k_{pitch} \Delta l_1, \quad (15)$$

где

$$k_{pitch} = \frac{2l_{01}}{\sqrt{4r^2 a_2^2 - c_1^2}}.$$

Угол наклона платформы по отношению к горизонту в продольной плоскости (тангаж) равен

$$\beta = \beta_p + \beta_k, \quad (16)$$

где  $\beta_k$  – угол наклона палубы корабля по отношению к горизонту в продольной плоскости, который отражает действие внешних волновых возмущений.

В соответствии с рис. 2, б можно получить аналогичные расчетные соотношения для угла крена  $\alpha_p$  стабилизированной платформы. В результате линеаризованная математическая модель для угла крена стабилизированной платформы имеет следующий вид:

$$\alpha_p = k_{roll} \Delta l_2, \quad (17)$$

$$\text{где } k_{roll} = \frac{2l_{02}}{\sqrt{4r_1^2 b_2^2 - c_2^2}}, \quad c_2 = b_2^2 + r_1^2 - l_{02}^2, \quad r_1 = \sqrt{h_0^2 + b_1^2}, \quad l_2 = l_{02} + \Delta l_2,$$

$\Delta l_2$  есть величина перемещения штока в цилиндре электро-гидравлического сервопривода, а величина  $l_{02}$  соответствует выполнению требования  $\alpha_p = 0$ .

Угол наклона платформы по отношению к горизонту в поперечной плоскости (крен) равен

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_k, \quad (18)$$

где  $\alpha_k$  – угол наклона палубы корабля по отношению к горизонту в поперечной плоскости, который отражает действие внешних волновых возмущений.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА

В качестве исполнительных механизмов для управления положением стабилизированной платформы могут быть использованы системы электромагнитного подвеса и двигатели постоянного тока. В то же время в условиях большой величины массы платформы и установленного на платформе оборудования наиболее эффективным является применение электрогидравлических приводов, которые позволяют обеспечить формирование требуемой величины силы для компенсации возмущений от волновых колебаний палубы корабля.

Рассматривая математическую модель электрогидравлического привода, будем полагать, что взаимосвязь положения золотника сервоклапана  $x_v$  [м] с величиной входного тока  $u = i_v$  [мА] моментного двигателя можно описать дифференциальным уравнением

$$\tau_v \dot{x}_v = -x_v + k_v u, \quad (19)$$

где  $\tau_v$  – постоянная времени;  $k_v$  – коэффициент усиления электромеханизма золотникового сервоклапана. Величина расхода  $Q_1$  рабочей жидкости гидроцилиндра зависит от смещения золотникового клапана  $x_v$  и давления рабочей жидкости  $P_h$  [21–23]:

$$Q_1 = C_d \omega x_v \sqrt{\frac{P_s - \text{sgn}(x_v) P_h}{\rho}}, \quad (20)$$

где  $Q_1$  – расход рабочей жидкости гидроцилиндра [ $\text{м}^3/\text{с}$ ];  $C_d$  – коэффициент расхода;  $\omega = \frac{\partial S}{\partial x_v}$  – градиент площади золотника сервоклапана;  $P_s$  – давление на входе гидроцилиндра [ $\text{н}/\text{м}^2$ ];  $P_h = P_A - P_B$  – перепад давления между полостями гидроцилиндра [ $\text{н}/\text{м}^2$ ];  $\rho$  – плотность масла в гидроцилиндре [ $\text{кг}/\text{м}^3$ ].

Линеаризация уравнения (20) при малых отклонениях золотника от нулевого положения позволяет получить следующее выражение для величины расхода  $Q_1$  рабочей жидкости гидроцилиндра [22, 23]:

$$Q_1 = K_q x_v - K_c P_h, \quad (21)$$

где  $K_q = \frac{\partial Q_1}{\partial x_v}$ ,  $K_c = -\frac{\partial Q_1}{\partial P_h}$ ,  $C_d$  – коэффициент расхода;  $K_q$  и  $K_c$  – коэффициент усиления потока/открытия и коэффициент усиления потока/давления соответственно.

Пренебрегая эффектами внешней утечки рабочей жидкости в гидроцилиндре, можно описать динамику привода:

$$Q_1 = A_h \dot{X}_h + \frac{V_h \dot{P}_h}{4E_h} + C_{hl} P_h, \quad (22)$$

где  $A_h$  – площадь поршня;  $V_h$  – объем камеры поршня;  $E_h$  – эффективный объемный модуль;  $X_h$  – перемещение штока;  $C_{hl}$  – общий коэффициент утечки. Согласно принципу баланса сил динамику перемещения штока гидроцилиндра можно описать уравнением

$$A_h P_h = m \ddot{X}_h + B_h \dot{X}_h + F, \quad (23)$$

где  $m$  – масса поршня и платформы;  $B_h$  – совокупный коэффициент смоделированных сил демпфирования и вязкого трения;  $F$  – сила внешней нагрузки, которая действует на поршень.

Обозначим  $X_1 = X_h$ ;  $X_2 = \dot{X}_h$ ;  $X_4 = x_v$ . В соответствии с уравнениями (19)–(23) представим математическую модель гидропривода в виде следующей структурной схемы (рис. 3).

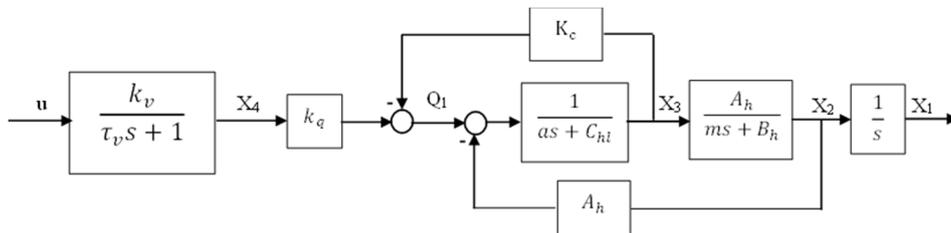


Рис. 3. Структурная схема математической модели электрогидравлического привода

Fig. 3. Block diagram of the mathematical model of the electrohydraulic drive

На рисунке  $\tau_1 = \tau_v$ , коэффициент  $a$  на данной структурной схеме равен следующей величине:  $a = V_h / 4E_h$ .

Из структурной системы на рис. 3 получим передаточную функцию электрогидропривода:

$$W(s) = \frac{x_1(s)}{u(s)} = \frac{b_0}{s(\tau_1 s + 1)(\tau_2^2 s^2 + 2d\tau_2 s + 1)}, \quad (24)$$

где

$$b_0 = \frac{k_v K_q A_h}{B_h C_{hl} + K_c B_h + A_h^2};$$

$$\tau_2 = \sqrt{\frac{m a}{B_h C_{hl} + K_c B_h + A_h^2}};$$

$$d = \frac{m C_{hl} + m K_c + a B_h}{2\tau_2 (B_h C_{hl} + K_c B_h + A_h^2)}.$$

В настоящей работе рассматривается модель электрогидропривода, параметры которого приведены в таблице [21].

**Параметры электрогидропривода**  
**Electrohydraulic drive parameters**

№ п/п	Параметры	Обозначение	Количество
1	Масса поршня и нагрузки	$m$	500 кг
2	Площадь поршня	$A_h$	$(1.47 \cdot 10^{-3}) \text{ м}^2$
3	Постоянная времени сервоклапана	$\tau_v$	0.001 с
4	Коэффициент усиления сервоклапана	$k_v$	$(3.04 \cdot 10^{-3}) \text{ м/А}$
5	Общий коэффициент утечки	$C_{hl}$	$(1 \cdot 10^{-11}) \text{ м}^3/\text{с/Па}$
6	Совокупный коэффициент смоделированных сил демпфирования и вязкого трения	$B_h$	$(1 \cdot 10^4) \text{ н с/м}$
7	Объем камеры цилиндра	$V_h$	$(1.47 \cdot 10^{-4}) \text{ м}^3$
8	Эффективный объемный модуль	$E_h$	$(8 \cdot 10^8) \text{ Па}$
9	Коэффициент усиления потока / открытия	$K_q$	$2.7 \text{ м}^2/\text{с}$
10	Усиление потока / давления	$K_c$	$(1.75 \cdot 10^{-11}) \text{ м}^3/\text{с/Па}$

На основе заданных в таблице параметров электрогидропривода получим следующие значения параметров передаточной функции (24):

$$\tau_1 = 0.001 \text{ с}, \quad \tau_2 = 0.0031 \text{ с}, \quad b_0 = 5.3366, \quad d = 0.9498.$$

Отметим, что обычно основную составляющую волнового возмущения, например, по тангажу можно представить в виде гармонического воздействия:

$$\beta_k(t) = A\beta_k \sin(\omega_k t + \varphi_k),$$

где  $\omega_k$  – частота колебания палубы корабля под воздействием волновых возмущений и ветра. Поэтому при значениях  $\omega_k \ll \tau_1^{-1}$ ,  $\omega_k \ll \tau_2^{-1}$  можно от математической модели вида (24) перейти к упрощенной математической модели электрогидропривода следующего вида:

$$W(s) = \frac{x_1(s)}{u(s)} = \frac{b_0}{s}.$$

В рассматриваемой кинематической схеме стабилизированной платформы используются два электрогидропривода. Перемещением штока  $\Delta l_1 = x_1$  первого привода изменяется угол наклона платформы по отношению к горизонту в продольной плоскости (тангаж), а перемещением поршня  $\Delta l_2 = x_1$  второго привода изменяется угол наклона платформы по отношению к горизонту в поперечной плоскости (крен). Полученные соотношения (15)–(18) и (24) позволяют описать взаимосвязь тангажа и крена стабилизированной платформы с параметрами кинематической схемы платформы и параметрами электрогидропривода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе получена математическая модель стабилизированной платформы с двумя степенями свободы, которая размещается на корабле. Рассмотрена математическая модель электрогидропривода. Приведены оценки величин параметров модели электрогидропривода. Полученная математическая модель может быть использована при решении задачи синтеза системы стабилизации углового положения платформы на корабле в условиях действия волновых возмущений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dynamics, and modeling of ocean waves / G.J. Komen, L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, P.A.E.M. Janssen. – Cambridge University Press, 1996. – 554 p.
2. 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, N 12. – P. 1534–1542.
3. Zhao X., Xu R., Kwan C. Ship-motion prediction: algorithms and simulation results // Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics IEEE. – Rockville, MD, 2004. – Vol. 5. – P. V-125.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.

8. 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.
9. *Ericson R.W., Dragen M.* Inertially stabilized platform technology concepts and principles // *IEEE Control Systems Magazine*. – 2008. – Vol. 28, N 1. – P. 26–46.
10. Kinematics, dynamics and control of a stabilized platform with 6-RUS parallel mechanism / E.Z. Zhao, H.N. Yu, J. Zhang, J.T. Yang, T.S. Zhao // *International Journal of Robotics and Automation*. – 2017. – Vol. 32, N 3. – P. 283–290.
11. *Masten M.K.* Inertially stabilized platforms for optical imaging – systems tracking dynamic targets with mobile sensors // *IEEE Control Systems Magazine*. – 2008. – Vol. 28, N 1. – P. 26–46.
12. *Barman S.D., Hussain A., Ahmed T.* Speed control of DC motor using PWM technique: Pulse width modulated DC motor control. – LAP Academic Publishing, 2012. – 56 p.
13. *Kılıç Z.* Design and control of a 2 DOF stabilizer: Thesis (M.S.). – Middle East Technical University, 2019. – 385 p.
14. *Гупалов В.И., Подгорная Л.Н., Ткаченко А.Н.* Стабилизированные платформы. – СПб.: ЛЭТИ, 2012. – 53 с.
15. *Батанов А.Ф., Хаханов Ю.А.* Малогабаритные многоосные высокоточные стабилизированные платформы для отработки новых технологий в условиях микрогравитации // Научное значение трудов К.Э. Циолковского: история и современность: материалы 55-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского – Калуга, 2020. – Ч. 2. – С. 80–82.
16. *Sushchenko O.* Robust control of inertially stabilized platforms for ground vehicles on the basis  $H_\infty$  synthesis // *Proceedings of National Aviation University*. – 2016. – N 3 (68). – P. 24–34.
17. *Hilkert J.M.* Inertially stabilized platform technology // *IEEE Control Systems Magazine*. – 2008. – Vol. 26, N 1. – P. 26–46.
18. *William S.C., Weber H.I.* Dynamic modeling of a 2-dof parallel electrohydraulic – actuated homokinetic platform // *Mechanism and Machine Theory*. – 2017. – Vol. 118. – P. 1–13.
19. *Devi N.R., Banik A.K., Barik M.* Dynamic response and control nonlinear coupled roll-pitch (2DOF) motion of ship under harmonic waves // *International Conference on Advances in Construction Materials and Structures (ACMS-2018)*. – ИТ Roorkee, Uttarakhand, India, 2018.
20. Математический анализ: примеры и задачи / Н.Г. Афондинова, И.Н. Омельченко, Г.В. Рыжаков, А.Ф. Салимова. – Военный учебно-научный центр ВВС, 2011.
21. Adaptive decoupling synchronous control of dissimilar redundant actuation system for large civil aircraft / C. Shi, X. Wang, S. Wang, J. Wang, M.M. Tomovic // *Aerospace Science and Technology*. – 2015. – Vol. 47. – P. 114–124.
22. *Yao J., Deng W.* Active disturbance rejection adaptive control of hydraulic servo systems // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2017. – Vol. 64, N 10. – P. 8023–8032. – DOI: 10.1109/TIE.2017.2694382.
23. Study of electro-hydraulic force servo control system based on fuzzy control / J.Y. Li, J.P. Shao, Z.W. Wang, B. Wu, G.H. Han // *IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*. – Shanghai, 2009. – P. 688–693. – DOI: 10.1109/ICICISYS.2009.5358308.

*Буй Ван Там*, аспирант кафедры автоматизации НГТУ. В 2006 г. окончил Военно-морскую академию в Нячанге. Получил степень М.С. (магистра) в области кибернетики и автоматизации в Военно-технической академии, Ханой, Вьетнам в 2014 г. С 2015 по 2019 г. участвовал в исследованиях Военно-морской академии Вьетнама. С 2009 г. преподавал в Военно-морской академии Вьетнама. Научные интересы: математические модели динамических систем; анализ качества переходных процессов в системах автоматического управления; методы синтеза регуляторов для стабилизированных платформ на кораблях. E-mail: tamtplt@gmail.com

*Bui Van Tam* is a PhD student at the NSTU Department of Automation. He graduated from the Naval Academy in Nha Trang in 2006 and obtained his M.S. (Master of Science) degree in Cybernetics and Automation from the Military Technical Academy, Hanoi, Vietnam in 2014. From 2015 to 2019. He participated in research at the Vietnam Naval Academy. Since 2009 he has been teaching at the Vietnam Naval Academy. His research interests include mathematically descriptive objects, automatic control system quality survey, and synthesizing controllers for objects on ships. E-mail: tamtplt@gmail.com

***A mathematical model of a stabilized platform with an electro-hydraulic drive on a ship*** \*

T.V. BUI

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx, 630073, Russian Federation

tamtlpt@gmail.com

**Abstract**

Stabilized platforms are used on all types of moving vehicles, from satellites to submarines, and are even used on some portable and terrestrial devices. For example, a stabilized platform on a ship is used to accommodate navigation equipment and antennas of radar communication systems, which improves the efficiency of this equipment under the influence of wave disturbances. There are various kinematic schemes for building ship stabilized platforms. In particular, serial stabilized platforms and parallel stabilized platforms are used. In practical applications, serial stabilized platforms have found wider use. In this paper, we consider a mathematical model of a ship-based stabilized platform with two degrees of freedom, where the angular orientation of the platform is controlled using electric hydraulic drives. The use of electro-hydraulic drives makes it possible to ensure the formation of the required magnitude of the force effect to compensate for disturbances from wave oscillations of the ship's deck. In order to obtain relations for describing the relationship between the angular displacements of the elements of the kinematic scheme of the platform and the displacement of the hydraulic cylinder rod, the apparatus of complex numbers is involved in this work. A mathematical model of an electrohydraulic drive is considered taking into account the dynamics of movement of the electromechanism of a spool servo valve, the flow rates and pressures of the working fluid in the cavities of the hydraulic cylinder. A linearized mathematical model of an electrohydraulic drive is considered, and estimates are obtained for the parameters of the obtained mathematical model for given mass-dimensional characteristics of an electrohydraulic drive. This mathematical model can be used in the synthesis of an electric hydraulic drive control system to provide a given angular orientation of the platform under the action of wave disturbances.

**Keywords:** Stabilized platform, kinematic scheme, angular stabilization, roll stabilization, pitch stabilization, wave disturbances, electrohydraulic drive, electrohydraulic drive mathematical model, linearized mathematical model, electrohydraulic drive model parameters

**REFERENCES**

1. Komen G.J., Cavaleri L., Donelan M., Haselmann K., Haselmann S., Jansen P.A.E.M. *Dynamics, and modeling of ocean waves*. Cambridge University Press, 1996. 554 p.
2. 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, no. 12, pp. 1534–1542.
3. Zhao X., Xu R., Kwan C. Ship-motion prediction: algorithms and simulation results. *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics IEEE*, Rockville, MD, 2004, vol. 5, p. V-125.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.

---

\* Received 19 February 2023.

8. 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.
9. Ericson R.W., Dragen M. Inertially stabilized platform technology concepts and principles. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008, vol. 28, no. 1, pp. 26–46.
10. Zhao E.Z., Yu H.N., Zhang J., Yang J.T., Zhao T.S. Kinematics, dynamics and control of a stabilized platform with 6-RUS parallel mechanism. *International Journal of Robotics and Automation*, 2017, vol. 32, no. 3, pp. 283–290.
11. Masten M.K. Inertially stabilized platforms for optical imaging – systems tracking dynamic targets with mobile sensors. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008, vol. 28, no. 1, pp. 26–46.
12. Barman S.D., Hussain A., Ahmed T. *Speed control of DC motor using PWM technique: Pulse width modulated DC motor control*. LAP Academic Publishing, 2012. 56 p.
13. Kılıç Z. *Design and control of a 2 DOF stabilizer*: Thesis (M.S.). Middle East Technical University, 2019. 385 p.
14. Gupalov V.I., Podgornaya L.N., Tkachenko A.N. *Stabilizirovannye platformy* [Stabilised platforms]. St. Petersburg, LETI Publ., 2012. 53 p.
15. Batanov A.F., Khakhanov Yu.A. [Small-sized multi-axis high-precision stabilized platforms for testing new technologies in microgravity]. *Nauchnoe znachenie trudov K.E. Tsiolkovskogo: istoriya i sovremennost'* [The scientific importance of K.E. Tsiolkovsky works: history and modernity]. Proceedings of the 55th Scientific Readings in Memory of K.E. Tsiolkovsky. Kaluga, 2020, pt. 2, pp. 80–82. (In Russian).
16. Sushchenko O. Robust control of inertially stabilized platforms for ground vehicles on the basis  $H_\infty$  synthesis. *Proceedings of National Aviation University*, 2016, no. 3 (68), pp. 24–34.
17. Hilkert J.M. Inertially stabilized platform technology. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008, vol. 26, no. 1, pp. 26–46.
18. William S.C., Weber H.I. Dynamic modeling of a 2-dof parallel electrohydraulic – actuated homokinetic platform. *Mechanism and Machine Theory*, 2017, vol. 118, pp. 1–13.
19. Devi N.R., Banik A.K., Barik M. Dynamic response and control nonlinear coupled roll-pitch (2DOF) motion of ship under harmonic waves. *International Conference on Advances in Construction Materials and Structures (ACMS-2018)*, IIT Roorkee, Uttarakhand, India, 2018.
20. Afendikova N.G., Omel'chenko I.N., Ryzhakov G.V., Salimova A.F. *Matematicheskii analiz: primery i zadachi* [Mathematical analysis. Examples and problems]. Military training manual BBC Publ., 2011.
21. Shi C., Wang X., Wang S., Wang J., Tomovic M.M. Adaptive decoupling synchronous control of dissimilar redundant actuation system for large civil aircraft. *Aerospace Science and Technology*, 2015, vol. 47, pp. 114–124.
22. Yao J., Deng W. Active disturbance rejection adaptive control of hydraulic servo systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, vol. 64, no. 10, pp. 8023–8032. DOI: 10.1109/TIE.2017.2694382.
23. Li J.Y., Shao J.P., Wang Z.W., Wu B., Han G.H. Study of electro-hydraulic force servo control system based on fuzzy control. *IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, Shanghai, 2009, pp. 688–693. DOI: 10.1109/ICICISYS.2009.5358308.

Для цитирования:

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.

For citation:

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.