

УДК 62-522:681.527.3

В.Т. Буй, В.Д. Юркевич

Резонансный ПИ-регулятор для судовой электрогидравлической стабилизированной платформы

Рассматривается задача стабилизации углового положения 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 углового положения платформы в пространстве в условиях волновых возмущений водной среды. Обсуждаемая задача управления состоит в устранении влияния волновых возмущений на угол наклона платформы относительно горизонта. Рассмотрена математическая модель стабилизированной платформы с электрогидроприводом и разработана методика синтеза системы управления, обеспечивающая эффективное подавление влияния волновых возмущений на угловое положение платформы. Новизна предлагаемого подхода к синтезу системы управления положением стабилизированной платформы заключается в применении метода разделения движений для расчета резонансного пропорционально-интегрального регулятора электрогидропривода платформы. Приведены результаты численного моделирования обсуждаемой системы управления.

Ключевые слова: гидравлический привод, стабилизированная платформа, система автоматического управления, метод разделения движений, резонансный регулятор, подавление волновых возмущений.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-2-81-87

При установке навигационного оборудования и радиолокационных антенн систем связи на палубе водного судна значительное влияние на эффективность работы данного оборудования оказывают волновые возмущения водной среды [1–3]. С целью уменьшения влияния данных возмущений навигационное оборудование размещают на специальной стабилизируемой платформе [4–7]. Использование системы угловой стабилизации платформы на судне позволяет изолировать оборудование от действия волновых возмущений [8, 9]. Существуют различные кинематические схемы построения корабельных стабилизированных платформ. В частности, применяются последовательные стабилизированные платформы и параллельные стабилизированные платформы [10]. В практических приложениях более широкое применение нашли последовательные стабилизированные платформы [11–15].

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. При решении задачи синтеза систем управления электрогидроприводом для стабилизации платформы на корабле могут быть использованы различные методы, такие как адаптивное управление [16, 17], бэкстеппинг [18–21], системы на основе формирования скользящих режимов [22], робастное управление [23]. В данной работе предлагается методика расчета резонансного пропорционально-интегрального регулятора электрогидрав-

лическим приводом для стабилизации угла отклонения платформы по отношению к горизонту. Рассматриваемый подход к синтезу системы управления электрогидравлическим приводом платформы основан на применении метода разделения движений [24–27] и принципа внутренней модели [28–31] для подавления влияния периодических возмущений от волновых колебаний палубы корабля.

В работе рассмотрены математическая модель стабилизированной платформы с электрогидроприводом, методика расчета параметров резонансного пропорционально-интегрального регулятора и приведены результаты численного моделирования обсуждаемой системы управления.

Постановка задачи управления

Кинематическая схема стабилизированной платформы на палубе корабля показана на рис. 1, где подвижная платформа представлена звеном a_2 [32]. Угол наклона стабилизированной платформы a_2 относительно горизонта зависит от угла наклона платформы β_p относительно палубы корабля и угла наклона палубы корабля β_k относительно горизонта:

$$\beta = \beta_p(l_1) + \beta_k, \quad (1)$$

где β – угол наклона для стабилизированной платформы a_2 относительно горизонта, который регулируется путем изменения длины звена l_1 при перемещении штока гидроцилиндра.

Возмущающим воздействием в данной системе является изменение угла наклона β_k палубы корабля относительно горизонта, которое обусловлено волновыми возмущениями водной среды. Предполагается, что основная составляющая данного возмущения может быть представлена в виде гармонического воздействия с известной частотой и неизвестной амплитудой

$$\beta_k(t) = A_{\beta_k} \sin(\omega_1 t + \varphi_1). \quad (2)$$

расчете параметров регулятора в дальнейшем рассматривается модель электрогидропривода без учета влияния постоянных времени τ_1 и τ_2 . Тогда из передаточной функции (10) следует линеаризованная модель электрогидропривода вида $\dot{x}_1(t) = bu(t)$, а путем дифференцирования выражения (1) получаем упрощенную математическую модель электрогидропривода с платформой следующего вида:

$$\frac{d\beta}{dt} = b_0u + F, \tag{11}$$

где $b_0 = [\partial\beta_p / \partial I_1]b$, $F = d\beta_k / dt$. В данном случае приведенное к входу электрогидропривода возмущение $F(t)$ обусловлено изменением угла наклона β_k палубы корабля относительно горизонта и является гармоническим волновым возмущением с известной частотой ω_1 и неизвестной амплитудой.

Синтез ПИ регулятора для электрогидравлического привода

Рассмотрим упрощенную математическую модель (11) для электрогидропривода с платформой и регулятором вида

$$\mu\dot{u} = -k_0[T^{-1}\beta + \beta], \tag{12}$$

где μ – малый положительный параметр. Отметим, что правая часть выражения (12) содержит эталонное уравнение для желаемого поведения регулируемой величины β :

$$T\dot{\beta} + \beta = 0. \tag{13}$$

Выполняя преобразование Лапласа для (12) при нулевых начальных условиях, получим

$$u(s) = -\frac{k_0(s+T^{-1})}{\mu s} \beta(s). \tag{14}$$

Выражение (14) также можно представить в виде

$$u(s) = -\frac{k_i}{s} \beta(s) - k_p \beta(s), \tag{15}$$

где $k_p = \frac{k_0}{\mu}$, $k_i = \frac{k_0}{\mu T}$. Таким образом, выражение (12) соответствует структуре ПИ-регулятора с коэффициентами k_i , k_p .

Для анализа процессов в системе (11) с регулятором (12) рассмотрим уравнения замкнутой системы управления.

$$\begin{cases} \dot{\beta} = b_0u + F, \\ \mu\dot{u} = -k_0[T^{-1}\beta + \beta]. \end{cases} \tag{16}$$

С целью анализа свойств процессов в замкнутой системе заменим β во втором уравнении системы (16) на правую часть первого уравнения данной системы. В результате получим сингулярно-возмущенную систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\beta}{dt} = b_0u + F, \\ \mu \frac{du}{dt} = -k_0[T^{-1}\beta + b_0u + F]. \end{cases} \tag{17}$$

Наличие малого положительного параметра μ в системе (17) приводит к формированию разнотемповых процессов в замкнутой системе управления. Рассмотрим процедуру выделения уравнений подсистем быстрых движений и медленных движений в системе (17). Введём в рассмотрение быстрое время t_0 , которое связано с исходным временем t следующим соотношением: $t = \mu t_0$. Тогда систему уравнений (17) можно представить в виде

$$\begin{cases} \frac{d\beta}{dt_0} = \mu[b_0u + F], \\ \frac{du}{dt_0} = -k_0b_0u - k_0[T^{-1}\beta + F]. \end{cases} \tag{18}$$

Полагаем, что $\mu \rightarrow 0$, тогда из системы уравнений (18) следует

$$\begin{cases} \frac{d\beta}{dt_0} = 0, \\ \frac{du}{dt_0} = -k_0b_0u - k_0[T^{-1}\beta + F], \end{cases} \tag{19}$$

где второе уравнение в системе (19) является уравнением подсистемы быстрых движений в масштабе быстрого времени t_0 . В терминологии работ [25, 26] данное уравнение называется присоединенной системой, которая при $F = \text{const}$ и $\beta = \text{const}$ имеет единственную точку равновесия.

Возвращаясь к исходной шкале времени t путем замены $t_0 = t/\mu$, получаем уравнение подсистемы быстрых движений

$$\mu \frac{du}{dt} = -k_0b_0u - k_0[T^{-1}\beta + F], \tag{20}$$

где β, F рассматриваются как «замороженные» переменные. Характеристический полином для ПБД (20) имеет вид

$$A_{\text{ПБД}}(s) = \mu s + b_0k_0. \tag{21}$$

Так как $\mu > 0$, тогда свойство устойчивости ПБД можно обеспечить выбором k_0 в соответствии с условием $k_0b_0 > 0$. Например, полагаем $k_0 = 1/b_0$.

Если процессы в ПБД устойчивы и $\mu \rightarrow 0$, тогда для равновесного режима ПБД получим $u = u^s$, где

$$u^s = -b_0^{-1}[T^{-1}\beta + F]. \tag{22}$$

Равновесному режиму ПБД (20) соответствует следующая вырожденная система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\beta}{dt} = b_0u^s + F, \\ 0 = -k_0b_0u^s - k_0[T^{-1}\beta + F]. \end{cases} \tag{23}$$

Исключив u^s из (23), получим уравнение подсистемы медленных движений (ПМД)

$$\frac{d\beta}{dt} = -T^{-1}\beta, \tag{24}$$

которое совпадает с эталонным уравнением (13), где характеристический полином для (24) имеет следующий вид:

$$A_{\text{ПМД}}(s) = s + T^{-1}, \tag{25}$$

который является устойчивым в силу условия $T > 0$.

Устойчивость полиномов (21), (25) для рассматриваемой сингулярно-возмущенной системы (17) обеспечивает выполнение условий применения метода разделения движений [24–26].

В данном случае устойчивость и быстрый переход в установившийся режим ПБД (20) приводят к формированию в рассматриваемой системе (17) для регулируемой величины β медленных процессов, которые соответствуют заданной эталонной модели (13) с характеристическим полиномом (25). При этом выбор величины параметра T в алгоритме управления (12) выполняется исходя из требования на желаемое время переходного процесса для регулируемой величины β в то время, как выбором величины параметра μ обеспечивается требование на разделение темпов быстрых и медленных процессов в замкнутой системе управления. Например, можно принять

$$\mu = T/\eta, \text{ где } \eta \geq 10. \quad (26)$$

С целью оценки влияния внешнего возмущения F на величину угла отклонения платформы β от линии горизонта рассмотрим передаточную функцию $S(s) = \beta(s)/F(s)$ для системы (11) с регулятором (12). Из уравнений (11), (12) получим

$$S(\mu, s) = \frac{\mu s^2}{\mu s^2 + b_0 k_0 (s + T^{-1})}. \quad (27)$$

Величина $|S(\mu, j\omega_1)|$ – оценка чувствительности угла отклонения платформы β от линии горизонта по отношению к гармоническому возмущению F с частотой ω_1 .

Так как основным назначением обсуждаемой системы управления является подавление влияния волновых колебаний палубы корабля на угол отклонения платформы от линии горизонта, дополнительную количественную оценку для выбора параметра μ в алгоритме управления (12) можно получить путем задания требования на значение амплитудно-частотной функции для (27) на частоте ω_1 в виде следующего условия:

$$|S(\mu_\varepsilon, j\omega_1)| = \varepsilon. \quad (28)$$

Решение уравнения (28) при условии $\mu_\varepsilon > 0$ имеет следующий вид:

$$\mu_\varepsilon = \frac{\varepsilon b_0 k_0}{T \omega_1^2 (1 - \varepsilon^2)} \left[\sqrt{1 + T^2 \omega_1^2 (1 - \varepsilon^2)} - \varepsilon \right], \quad (29)$$

где при $0 < \mu \leq \mu_\varepsilon$ справедливо условие $|S(\mu, j\omega_1)| \leq \varepsilon$.

Синтез резонансного ПИ-регулятора для электрогидравлического привода

Отметим, что для передаточной функции (27) имеет место свойство

$$|S(\mu, j\omega_1)| \neq 0 \text{ при } \omega_1 \neq 0. \quad (30)$$

Таким образом, в системе (11), (12) не обеспечивается асимптотическое стремление к нулю (4) для угла отклонения платформы β от линии горизонта в условиях действия гармонического возмущения (2). Уменьшить влияние возмущения (2) на угол β возможно путем уменьшения величины параметра μ , однако это приводит к увеличению коэффициентов k_p, k_i и усложняет практическую реализацию ПИ-регулятора (15).

С целью обеспечения свойства асимптотического стремления к нулю (4) для угла отклонения платформы β от линии горизонта предлагается использовать модифицированную структуру ПИ-регулятора с дополнительным резонансным блоком. Предлагаемая структура регулятора имеет вид

$$u(s) = -\frac{k_0(s + T^{-1})}{\mu s} \left[1 + \frac{k_r s}{s^2 + \omega_1^2} \right] \beta(s). \quad (31)$$

Из уравнений (11), (31) получим

$$S(\mu, s) = \frac{\mu s^2 (s^2 + \omega_1^2)}{\mu s^2 (s^2 + \omega_1^2) + b_0 k_0 (s + T^{-1})(s^2 + k_r s + \omega_1^2)}. \quad (32)$$

Здесь параметр k_r в резонансном блоке можно принять равным следующей величине: $k_r = 2\omega_1$.

Для передаточной функции (32) выполняется условие $|S(\mu, j\omega_1)| = 0$ при $\omega_1 \neq 0$, что позволяет обеспечить выполнение требования (4). В результате получаем систему для стабилизации угла отклонения платформы β относительно линии горизонта, которая в установившемся режиме является нечувствительной по отношению к внешнему гармоническому возмущению с частотой ω_1 .

Заметим, что анализ свойств замкнутой системы для модели электрогидропривода с платформой (11) и резонансным регулятором (31) выполняется аналогичным образом методом разделения движений путем выделения уравнений подсистем быстрых и медленных движений. При этом уравнение характеристического полинома подсистемы быстрых движений, как и в предыдущем случае, имеет вид (21), а уравнение характеристического полинома подсистемы медленных движений принимает следующий вид:

$$A_{ПМД}(s) = b_0 k_0 (s + T^{-1})(s^2 + k_r s + \omega_1^2). \quad (33)$$

Таким образом, при введении резонансной компоненты в регулятор (31) можно использовать представленные выше расчетные соотношения для выбора параметров k_0 , T и μ пропорционально-интегральной компоненты регулятора. Отличие возникает только в появлении дополнительного условия на выбор параметра μ следующего вида:

$$\mu \leq 1/(\omega_1 \eta). \quad (34)$$

Данное условие требуется для выполнения требования на разделение темпов быстрых и медленных процессов в замкнутой системе управления с резонансным регулятором.

Результаты численного моделирования

С целью иллюстрации свойств обсуждаемой системы управления было проведено численное моделирование. В таблице приведены параметры электрогидропривода (см. рис. 2), которые были использованы для численного моделирования.

При параметрах электрогидропривода из таблицы получены параметры передаточной функции (10):

$$\tau_1 = 0,001 \text{ с}; \tau_2 = 0,0031 \text{ с}; b = 5,3366; d = 0,9498.$$

При моделировании задано, что $\partial \beta_p / \partial l_1 = 0,1$.

В соответствии с рассмотренными расчетными соотношениями заданы параметры регулятора:

$$\omega_1 = 2; k_r = 4; T = 0,5; \eta = 20; \mu = T/\eta; k_0 = 1/b_0;$$

$$b_0 = [\partial \beta_p / \partial l_1] b; k_i = k_0/(\mu T); k_p = k_0/\mu.$$

Параметры электрогидропривода

№	Параметры	Сим-вол	Кол-во
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	τ_v	0,001 с
4	Коэффициент усиления сервоклапана	k_v	$3,04 \cdot 10^{-3} \text{ м/А}$
5	Общий коэффициент утечки	C_{nl}	$1 \cdot 10^{-1} \text{ м}^3/\text{с/Па}$
6	Совокупный коэффициент смоделированных сил демпфирования и вязкого трения	B_h	$1 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$
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	$1,75 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{с/Па}$

Результаты численного моделирования приведены на рис. 3 и 4. Сравнение графиков на рис. 3 и 4 для угла отклонения платформы β от линии горизонта показывает, что применение резонансного ПИ-регулятора (31) позволяет обеспечить нечувствительность поведения β по отношению к внешнему гармоническому возмущению с частотой ω_1 в установившемся режиме работы системы управления.

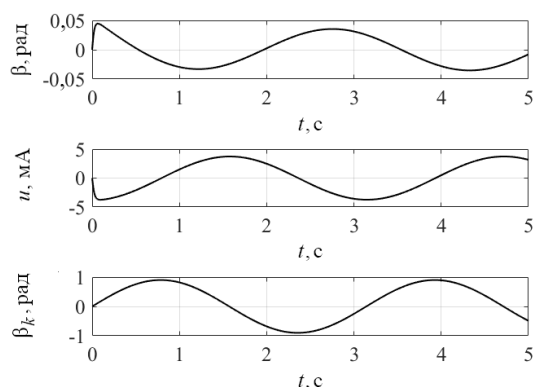


Рис. 3. Результат моделирования для электрогидропривода с передаточной функцией (10) и ПИ-регулятором (12) без резонансного блока

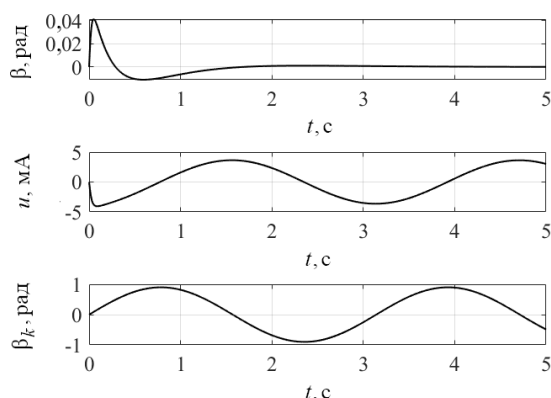


Рис. 4. Результат моделирования для электрогидропривода с передаточной функцией (10) и резонансным ПИ-регулятором (31)

Отметим, что при обсуждаемых параметрах электрогидропривода, алгоритма управления и

$\varepsilon = 0,04$ соотношения (26), (29) и (34) дают множество оценок (0,025; 0,0275; 0,025) для выбора параметра μ . Соответственно, при численном моделировании параметр μ был выбран равным минимальному значению из этих оценок.

Закключение

Результаты моделирования показывают, что применение предлагаемого резонансного ПИ-регулятора для электрогидропривода стабилизируемой платформы позволяет обеспечить эффективное подавление влияния волновых возмущений с известной частотой, но неизвестной амплитудой.

Применение метода разделений движений позволяет получить простые расчетные соотношения для выбора параметров резонансного ПИ-регулятора в условиях неполной информации о параметрах стабилизируемой платформы.

Необходимо отметить, что вопросы анализа влияния неучтенной динамики, которая представлена в передаточной функции электрогидропривода (10) двумя звеньями с постоянного времени τ_1 и τ_2 , а также вопросы анализа влияния нелинейности исходной модели электрогидропривода на свойства обсуждаемой системы управления требуют проведения дополнительных исследований.

Литература

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, No. 12. – P. 1534–1542.
3. Zhao X. Ship-motion prediction: algorithms and simulation results / X. Zhao, R. Xu, C. Kwan // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Canada. – 2004. – Vol. 125.
4. Devi N.R. Dynamic response and control nonlinear coupled roll-pitch (2 DOF) motion of the ship under harmonic waves / N.R. Devi, A.K. Banik, M. Barik // International Conference on Advances in Construction Materials and structures (ACMS-2018), India. – 2018.
5. Gu J.Y. Nonlinear rolling motion of ship in random beam seas // Journal of Marine Science and Technology. – 2004. – Vol. 12, No. 4. – P. 273–279.
6. Active disturbance rejection control for gun control of unmanned turret / L. Ye, Y. Xia, M. Fu, C. Li // Control Theory Appl. – 2014. – Vol. 31, No. 11. – P. 1580–1588.
7. Habib A.A.A.A. Simple computational platform of ship stability for engineering education / A.A.A.A. Habib, A.E.M. Ali, M.A.M. Nawar // IUGRC International Undergraduate Research Conference, Military Technical College, Egypt. – 2018. – No. 3. – P. 6.
8. Xu C.C. A novel 2R parallel mechanism for alt-azimuth pedestal / C.C. Xu, C. Xue, X.C. Duan // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 428 (2018). – P. 012053. DOI:10.1088/1757-899X/428/1/012053.
9. Cao Y. Review of antiswing control of shipboard cranes / Y. Cao, T. Li // IEEE/CAA Journal of Automatica, Sinica. – 2020. – Vol. 7, No. 2. – P. 346–354.
10. 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, China. – 2013. – Vol. 319. – P. 414–418.

11. Hilkert J.M. Inertially stabilized platform technology concepts and principles // *IEEE Control Systems Magazine*. – 2008. – Vol. 28, No. 1. – P. 26–46.
12. Kinematics, dynamics and control of a stabilized platform with 6-RUS parallel mechanism / Y. Zhao, H. Yu, J. Zhang, J. Yang, T. Zhao // *International Journal of Robotics and Automation*. – 2017. – Vol. 32, No. 3. – P. 283–290.
13. Masten M.K. Inertially stabilized platforms for optical imaging-systems // *IEEE Control Systems Magazine*. – 2008. – Vol. 28, No. 1. – P. 26–46.
14. Barman S.D. Speed control of DC motor using PWM Technique: Pulse Width Modulated DC Motor Control / S.D. Barman, A. Hussain, T. Ahmed. – London, United Kingdom: LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2012. – 56 p.
15. Kilic Z. Design and Control of a 2 DOF Stabilizer // Partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science Mechanical Engineering. – 2019. – 385 p.
16. Yao J. Active disturbance rejection adaptive control of hydraulic servo systems / J. Yao, W. Deng // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2017. – Vol. 64, No. 10. – P. 8023–8032.
17. Zhu Y. The adaptive control simulation of electro-hydraulic proportional system / Y. Zhu, J. Liu // 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, China. – 2010. – P. 199–201.
18. Zibin X. Adaptive backstepping neural network control of electro-hydraulic position servo system / X. Zibin, M. Jianqing, J. Ruan // 2008 2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics, China. – 2008. – P. 1–4. DOI: 10.1109/ISSCAA.2008.4776176.
19. Chen Y. Backstepping controller design for electro-hydraulic servo system with sliding observer // *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, China*. – 2010. – P. 391–394.
20. Kaddissi C. Identification and real-time control of an electrohydraulic servo system based on nonlinear backstepping / C. Kaddissi, J.P. Kenne, M. Saad // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. – 2007. – Vol. 12, No. 1. – P. 12–22.
21. Robust adaptive backstepping control design for a nonlinear hydraulic-mechanical system / M. Choux, H.R. Karimi, G. Hovland, M.R. Hansen, M. Ottestad, M. Blanke // *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference, China*. – 2009. – P. 2460–2467.
22. Wang H. A hybrid adaptive wavelet neural network control and sliding mode control for electro-hydraulic servo system / H. Wang, J. Qiao, Q. Wang // *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, China*. – 2010. – P. 2328–2333.
23. Robust trajectory tracking for an electrohydraulic actuator / A.G. Loukianov, J. Rivera, Y.V. Orlov, E.Y. Morales Teraoka // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2009. – Vol. 56, No. 9. – P. 3523–3531.
24. Мееров М.В. Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1959. – 284 с.
25. Тихонов А.Н. Системы дифференциальных уравнений, содержащие малые параметры при производных // *Математический сборник*. – 1952. – Т. 31, № 3. – С. 575–586.
26. Климушев А.И., Красовский Н.Н. Равномерная асимптотическая устойчивость систем дифференциальных уравнений с малыми параметрами при производных // *Прикладная математика и механика*. – 1961. – Т. 25, вып. 4. – С. 680–694.
27. Юркевич В.Д. Многоканальные системы управления. Синтез линейных систем с разнотемповыми процессами. – Новосибирск, 2016. – 183 с.
28. Francis B.A. The internal model principle of control theory / B.A. Francis, W.M. Wonham // *Automation*. – 1979. – Vol. 12, No. 5. – P. 457–465.
29. Lorenzini C. A generalized forced oscillation method for tuning proportional-resonant controllers / C. Lorenzini, L.F.A. Pereira, A.S. Bazanella // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. – 2020. – Vol. 28, No. 3. – P. 1108–1115.
30. Yurkevich V.D. PID resonant controller for suppressing the oscillations of an elastic suspension / V.D. Yurkevich, V.T. Bui // 2022 16th International Conference on Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems (Pyatnitskiy's Conference), Moscow, Russian Federation. – 2022. – P. 1–3.
31. Yurkevich V.D. PIR-controller design based on time-scale separation method and internal model principle for harmonics disturbances suppression // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2021. – Vol. 57, No. 4. – P. 363–370.
32. Bui V.T. Synthesis of an adaptive slide controller for a stabilized object on the ship // 2020 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, Russia. – 2020. – P. 237–240.

Буй Ван Там

Аспирант каф. автоматике Новосибирского государственного технического университета (НГТУ) К. Маркса пр-т, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073
Тел.: +7-913-908-89-19
Эл. почта: tamtpt@gmail.com

Юркевич Валерий Дмитриевич

Д-р техн. наук, проф. каф. систем информатики и каф. автоматике Новосибирского государственного университета (НГУ) и НГТУ К. Маркса пр-т, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073
ORCID: 0000-0001-8200-5531
Тел.: +7-906-194-29-40
Эл. почта: yurkev@mail.ru

Bui V.T., Yurkevich V.D.

Resonant PI controller for shipboard electrohydraulic stabilized platform

The problem of stabilizing the angular position of the platform installed on the deck of a water vessel is considered. The platform is used to accommodate navigational equipment and radar antennas of communication systems that require stabilization of the platform's angular position in space under conditions of wave perturbations of the aquatic environment to work efficiently. The task under discussion is to eliminate the influence of wave perturbations on the platform's angle of inclination relative to the horizon. A mathematical model of a stabilized platform with an electric hydraulic drive is considered and a technique for synthesizing a control system that provides effective suppression of the influence of wave perturbations on the angular position of the platform is developed. The novelty of the proposed approach to the synthesis of the control system of the stabilized platform position consists in applying the time-scale separation method for calculating the resonant proportional-integral controller of the electrohydraulic drive of the platform. The results of numerical simulation of the control system under discussion are presented.

Keywords: hydraulic drive, stabilized platform, automatic control system, time-scale separation method, resonant controller, wave perturbation suppression.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-2-81-87

References

1. Komen G.J., Cavaleri L., Donelan M., Hasselmann K., Hasselmann S., Janssen 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. *2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Canada, 2004, vol. 125. DOI: 10.1109/ICASSP.2004.1327063.
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)*, March 7–8, 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)*, India, March 7–8, 2018.
6. Ye Y., 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. *IUGRC International Undergraduate Research Conference*, Military Technical College, Cairo, Egypt, 2018, no. 3, pp. 6.
8. Xu C.C., Xue C., Duan X.C. A novel 2R parallel mechanism for alt-azimuth pedestal. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 428 (2018) 012053. DOI: 10.1088/1757-899X/428/1/012053.
9. Cao Y., Li T. Review of antiswing control of shipboard cranes. *IEEE/CAA Journal of Automatica*, Sinica, 2020, vol. 7, no. 2, pp. 346–354.
10. 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*, China, 2013, vol. 319, pp. 414–418.
11. Hilkert J.M. Inertially stabilized platform technology concepts and principles. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008, vol. 28, no. 1, pp. 26–46.
12. Zhao Y., Yu H., Zhang J., Yang J., Zhao T. 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.
13. Masten M.K. Inertially stabilized platforms for optical imaging-systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008, vol. 28, no. 1, pp. 26–46.
14. Barman S.D., Hussain A., Ahmed T. Speed control of DC motor using PWM Technique: *Pulse Width Modulated DC Motor Control*. London, United Kingdom, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012, 56 p.
15. Kilic Z. *Design and Control of a 2 DOF Stabilizer*. In partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science Mechanical Engineering, 2019, 385 p.
16. 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.
17. Zhu Y., Liu J. The Adaptive control simulation of electro-hydraulic proportional system. *International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering*, China, 2010, pp. 199–201.
18. Zibin X., Jianqing M., Ruan J. Adaptive backstepping neural network control of electro-hydraulic position servo system. *2008 2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics*, China, 2008, pp. 1–4.
19. Chen Y. Backstepping Controller design for electro-hydraulic servo system with sliding observer. *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*, China, 2010, pp. 391–394.
20. Kaddissi C., Kenne J.P., Saad M. Identification and real-time control of an electrohydraulic servo system based on nonlinear backstepping. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2007, vol. 12, no. 1, pp. 12–22.
21. Choux M., Karimi H.R., Hovland G., Hansen M.R., Ottestad M., Blanke M. Robust adaptive backstepping control design for a nonlinear hydraulic-mechanical system. *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference*, China, 2009, pp. 2460–2467.
22. Wang H., Qiao J., Wang Q. A Hybrid adaptive wavelet neural network control and sliding mode control for electro-hydraulic servo system. *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*, China, 2010, pp. 2328–2333.
23. Loukianov A.G., Rivera J., Orlov Y.V., Teraoka E.Y.M. Robust trajectory tracking for an electrohydraulic actuator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, vol. 56, no. 9, pp. 3523–3531.
24. Meerov M.V. *Sintez struktur sistem avtomaticheskogo regulirovaniya vysokoy tochnosti* [Synthesis of structures for high-precision automatic control systems]. State Publishing House of Physical and Mathematical Literature, Moscow, 1959. 284 p.
25. Tikhonov A.N. *Sistemy differentsial'nykh uravneniy, soderzhashchiye malyye parametry pri proizvodnykh. Matematicheskiy sbornik* [Systems of differential equations containing a small parameter multiplying the derivative]. *Mathematical Sbornik* (Moscow), 1952, vol. 31, no. 3, pp. 575–586.
26. Klimushchev A.I., Krasovskii N.N. *Ravnomernaya asimptoticheskaya ustoychivost' sistem differentsial'nykh uravneniy s malymi parametrami pri proizvodnykh. Prikladnaya matematika i mekhanika* [Uniform asymptotic stability of systems of differential equations with a small parameter in the derivative terms]. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1961, vol. 25, no. 4, pp. 680–694.
27. Yurkevich V.D. *Mnogokanal'nyye sistemy upravleniya. Sintez lineynykh sistem s raznotempovymi protsessami* [Multi-input-multi-output control systems. Design of linear control systems with multi-time scale motions]. Novosibirsk, 2016, 183 p.
28. Francis B.A., Wonham W.M. The internal model principle of control theory. *Automation*, 1979, vol. 12, no. 5, pp. 457–465.
29. Lorenzini C., Pereira L.F.A., Bazanella A.S. A generalized forced oscillation method for tuning proportional-resonant controllers. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2020, vol. 28, no. 3, pp. 1108–1115.
30. Yurkevich V.D., Bui V.T. PID resonant controller for suppressing the oscillations of an elastic suspension. *2022 16th International Conference on Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems* (Pyatnitskiy's Conference), Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 1–3.
31. Yurkevich V.D. PIR-controller design based on time-scale separation method and internal model principle for harmonic disturbance suppression. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2021, vol. 57, no. 4, pp. 363–370.
32. Bui V.T. Synthesis of an adaptive slide controller for a stabilized object on the ship. *2020 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE)*, Russia, 2020, pp. 237–240.

Van T. Bui

Postgraduate student, Department of Automation, Novosibirsk State Technical University (NSTU)
20, K. Marx pr., Novosibirsk, Russia, 630073
Phone: +7-913-908-89-19
Email: tamtplt@gmail.com

Valery D. Yurkevich

Doctor of Science in Engineering, Professor,
Department of Informatics Systems, Department of Automation, Novosibirsk State University, NSTU
20, K. Marx pr., Novosibirsk, Russia, 630073
ORCID: 0000-0001-8200-5531
Phone: +7-906-194-29-40
Email: yurkev@mail.ru