

15. Alitshuler H., Wagner I.V., Bruckstein F.M. With caution-decreasing a swarm robotics' efficiency by imprudently enhancing the robots' capabilities, *IEEE Xplore Conference: Autonomous Robots and Agents*, 2009. DOI: 10.1109/ICARA.2000.4804014.
16. Elshamy W. Adaptive Control in Swarm Robotics Computer Science, 2021. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Adaptive-Control-in-Swarm-Robotics-Elshamy/b112317012d4380a0311276936ddefd7c8cddd16>.
17. Hayes A.T. How Many Robots? Group Size and Efficiency in Collective Search Tasks, *Distributed Autonomous Robotic Systems*, 2002, No. 5, pp. 289-298. DOI: 10.1007/978-4-431-65941-9_29.
18. Mochalkin A.S., Voshchuk D.S., Voshchuk G.Yu., Mayorov I.V. Razrabotka setetsentricheskoy intellektual'noy sistemy adaptivnogo planirovaniya deystviy gruppy avtonomnykh bespilotnykh apparatov dlya soglasovannogo vypolneniya postavlennykh zadach [Development of a network-centric intelligent system for adaptive planning of actions of a group of autonomous unmanned vehicles for the coordinated performance of assigned tasks], *Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh: Tez. dokl. X Vserossiyskoy nauch.-prakt. konf. Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya* [Management and processing of information in technical systems: Abstracts of the X All-Russian Scientific and Practical Conference Perspective systems and management tasks.]. Rostov-on-Don, 2015, pp. 166-172.
19. Mayorova V.I., Bannikov A.M., Grishko D.A., Zharinov I.S., Leonov V.V., A.G. Toporkov, Kharlan A.A. Kontrol' sostoyaniya sel'skokhozyaystvennykh poley na osnove prognozirovaniya dinamiki indeksa NDVI po dannym kosmicheskoy mul'tispektral'noy i giperspektral'noy s"emki [Monitoring the state of agricultural fields based on forecasting the dynamics of the NDVI index according to the data of space multispectral and hyperspectral surveys], *Nauka i obrazovanie* [Science and Education], 2013, No. 7, pp. 199-228.
20. Skobelev P. Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management, *Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry*, Eds.: P. Leitão, S. Karnouskos. Elsevier, 2015, pp. 207-230.

Статью рекомендовал к опубликованию д.в.н., доцент А.А. Селиванов.

Абросимов Вячеслав Константинович – Главный научно-исследовательский испытательный межвидовой центр перспективного вооружения Министерства Обороны РФ; e-mail avk787@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +7916 815 35 12; д.т.н.; с.н.с.; в.н.с.

Седов Александр Николаевич – НПК "Сетецентрические платформы"; e-mail: a-mochalkin@mail.ru; г. Самара, Россия; тел.: +79613848484; Генеральный директор.

Abrosimov Vyacheslav Konstantinovich – Chief Research and Testing Interspecific Armament Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail avk787@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79168153512; dr. of eng. sc.; senior researcher; leading researcher.

Sedov Alexander Nikolaevich – NPK "Network-centric platforms"; e-mail a-mochalkin@mail.ru; Samara, Russia; phone: +79613848484; CEO.

УДК 621.337.11:004.942:519.876.5

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-19-31

П.П. Чернусь, П.П. Чернусь, А.А. Яковлев, Р.В. Сахабудинов, А.С. Голосий

СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОДВОДНОГО ОБЪЕКТА

Представлены результаты разработки и синтеза гидравлической системы стабилизации подводного объекта. Для полноты и точности математического моделирования в гидравлической системе учтены силы сухого трения между поршнем и стенками гидроцилиндра, силы сухого трения между штоком и гидроцилиндром, которые в сумме определяют общую силу сухого трения в активном гидроцилиндре, общие силы сухого трения в пассивном гидроцилиндре, ускорения движения. Также учтены приведенная масса системы блоков и полиспаста, массы подвижных частей активного и пассивного гидроцилиндров. После расчета мас-

совых и динамических характеристик гидравлической системы стабилизации было проведено математическое моделирование разработанной системы. В процессе разработки и синтеза системы были учтены особенности и типовые нелинейности входящих в состав системы гидравлической и пневматической частей, такие как расходная характеристика гидрораспределителя золотникового типа, малые расходы утечек и сжатия в рабочих полостях активного гидроцилиндра. При проектировании был принят адиабатический характер процесса в пневмогидровытеснителе, поскольку реакция и движение гидравлической системы стабилизации происходит достаточно быстро, в виду чего тепловой обмен с окружающей средой будет пренебрежимо мал. В процессе синтеза математической модели системы учитывается нелинейность коэффициента упругости троса. Проведено исследование устойчивости математической модели системы стабилизации и проведен синтез системы управления гидравлической частью системы с использованием ПИД-регулятора. Расчет параметров ПИД-регулятора произведен с применением стандартной методики расчета. Поскольку результат работы системы стабилизации при таком синтезе системы управления сильно зависит от сигнала возмущения, было принято решение повысить инвариантность системы по отношению ко входному сигналу путем введения комбинированного управления. Такое улучшение системы оказалось достаточным для повышения качества работы математической модели гидравлической системы стабилизации. Проведено цифровое перепроектирование регулятора, учтены особенности работы аналого-цифровых преобразователей датчиков. Результаты моделирования показали работоспособность такой системы управления.

Гидропривод; устойчивость; синтез систем управления; комбинированное управление; цифровое перепроектирование; период дискретизации по времени.

P.P. Chernus, P.P. Chernus, A.A. Yakovlev, R.V. Sakhabudinov, A.S. Golosiy

SYNTHESIS OF A DIGITAL REGULATOR OF A HYDRAULIC SYSTEM FOR STABILIZING AN UNDERWATER OBJECT

The article presents the results of the development and synthesis of a hydraulic system for stabilizing an underwater object. For completeness and accuracy of mathematical modeling in the hydraulic system, the forces of dry friction between the piston and the walls of the hydraulic cylinder, the forces of dry friction between the rod and the hydraulic cylinder, which together determine the total dry friction force in the active hydraulic cylinder, the total dry friction force in the passive hydraulic cylinder, and the acceleration of movement, are taken into account. Also taken into account is the reduced mass of the system of blocks and chain hoist, the mass of the moving parts of the active and passive hydraulic cylinders. After calculating the mass and dynamic characteristics of the hydraulic stabilization system, mathematical modeling of the developed system was carried out. In the process of developing and synthesizing the system, the features and typical non-linearities of the hydraulic and pneumatic parts included in the system were taken into account, such as the flow characteristic of a spool-type hydraulic valve, low leakage and compression costs in the working cavities of the active hydraulic cylinder. When designing, the adiabatic nature of the process in the pneumohydraulic displacer was adopted, since the reaction and movement of the hydraulic stabilization system occurs quite quickly, which means that the heat exchange with the environment will be negligible. In the process of synthesizing the mathematical model of the system, the nonlinearity of the rope elasticity coefficient is taken into account. A study of the stability of the mathematical model of the stabilization system was carried out and a synthesis of the control system for the hydraulic part of the system was carried out using a fairly common PID controller. The PID controller parameters were calculated using a standard calculation method. Since the result of the operation of the stabilization system with such a synthesis of the control system strongly depended on the perturbation signal, it was decided to increase the invariance of the system with respect to the input signal by introducing a combined control. Such an improvement of the system turned out to be sufficient to improve the quality of the mathematical model of the hydraulic stabilization system. A digital redesign of the controller was carried out, the features of the operation of analog-to-digital transducers of sensors were taken into account. The simulation results showed the operability of such a control system.

Hydraulic drive; stability; synthesis of control systems; combined management; digital redesign; time sampling period.

Введение. Схема работы рассматриваемой системы стабилизации представлена на рис. 1. Здесь 1 – пневмогидроаккумулятор; 2 – пассивный гидроцилиндр; 3 – активный гидроцилиндр; 4 – вьюшка; 5 – лебедка транзитная; 6 – датчик натяжения; 7 – выключатель бесконтактный SQ2; 8 – выключатель бесконтактный SQ1; 9 – гидроцилиндр; 10 – пневмогидроаккумулятор; 11, 12, 13, 19 – блок неподвижный; 14, 18 – блок подвижный; 15 – каретка; 16 – каретка; 17 – датчик линейных перемещений; 20, 21, 22, 23, 26, 27 – блок направляющий; 24, 28 – акселерометр; 25, 29 – канифас-блок; 30 – штырь; 31 – выключатель бесконтактный SQ3; 32 – выключатель бесконтактный SQ4; 33 – привод заштыривания; А, Б, В, Г, Д, Е, Ж, И – полость.

Уравнение сил в активном гидроцилиндре может быть записано в виде:

$$F_{\text{И}} = F_f + F_{\text{visc}} + F_{\text{dry}} + F_{\text{дин}}, \quad (1)$$

где $F_{\text{И}} = S_{\text{П}}(P_1 - P_2)$ – индикаторное усилие на штоке активного гидроцилиндра, $S_{\text{П}}$ – эффективная площадь поршня активного гидроцилиндра, P_1 и P_2 – давления в полостях активного гидроцилиндра; F_f – внешнее усилие на штоке (возмущающее воздействие); $F_{\text{visc}} = f_{\text{fr}} v_{\text{ш}}$ – сила вязких трений на штоке, f_{fr} – коэффициент вязких трений, $v_{\text{ш}}$ – скорость перемещения штока активного гидроцилиндра; F_{dry} – сила сухих трений активного гидроцилиндра; $F_{\text{дин}} = M \frac{d}{dt} v_{\text{ш}}$ – динамическая сила на штоке активного гидроцилиндра, M – общая масса подвижных частей активного и пассивного гидроцилиндров [1–3].

При расчетах была учтена сила сухого трения между поршнем и стенками гидроцилиндра, штоком и гидроцилиндром по следующей зависимости

$$F_{\text{тр}} = \pi D l_1 f_{\text{ф}} P, \quad (2)$$

где D, l_1 – диаметр и ширина контактной поверхности колец, см, $f_{\text{ф}}$ – коэффициент трения фторопласта, P – давление рабочей среды, кгс/см² [4, 5].

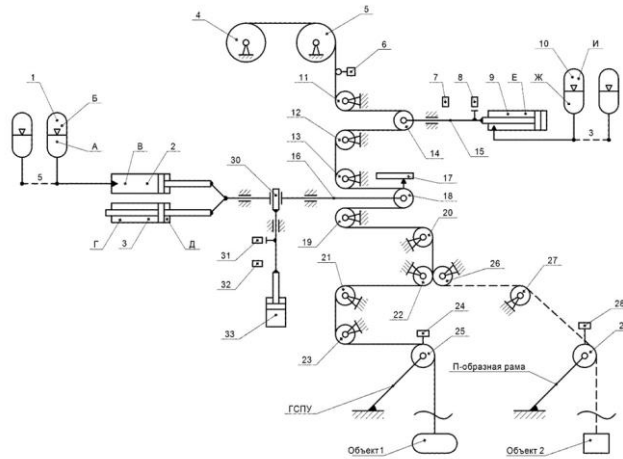


Рис. 1. Система стабилизации подводного объекта

Расчет параметров математической модели, таких как силы сухого трения между поршнем и стенками гидроцилиндра, силы сухого трения между штоком и гидроцилиндром, которые в сумме определяют общую силу сухого трения в активном гидроцилиндре, общей силы сухого трения в пассивном гидроцилиндре, ускорения движения, учет приведенной массы системы блоков и полиспаста, массы подвижных частей активного и пассивного гидроцилиндров был подробно рассмотрен в публикации [6].

Математическая модель системы стабилизации. На основании полученных динамических параметров была спроектирована математическая модель механической части активного гидроцилиндра (рис. 2).

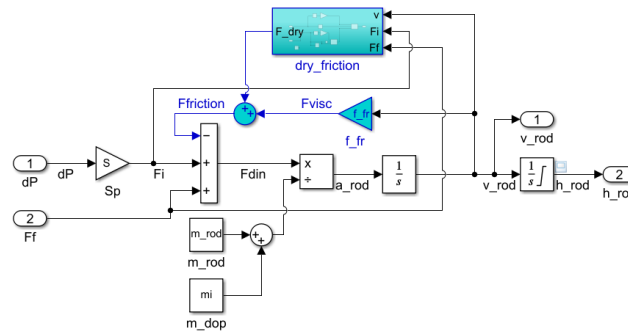


Рис. 2. Математическая модель механической части активного гидроцилиндра

Математическая модель уравнения расходов активного гидроцилиндра вместе с моделью золотникового гидрораспределителя представлены на рисунке (рис. 3).

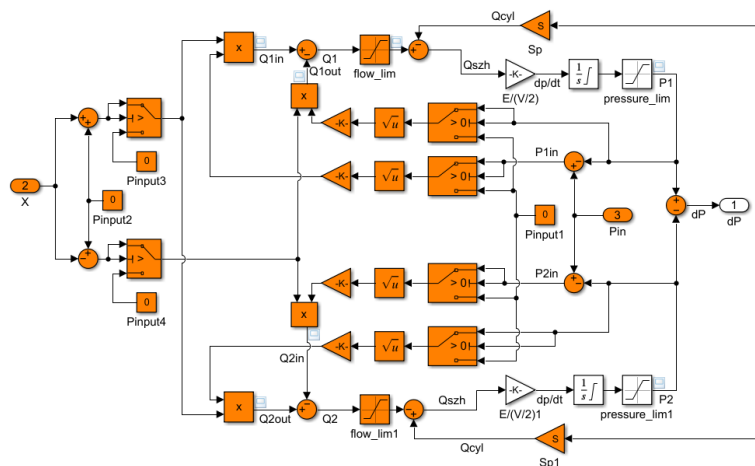


Рис. 3. Модель расходов гидроцилиндра и золотникового распределителя

Математическая модель пневмогидравтеснителя, созданная при условии адиабатического характера процесса (перемещение штоков происходит достаточно быстро [7–12]) представлена на рис. 4.

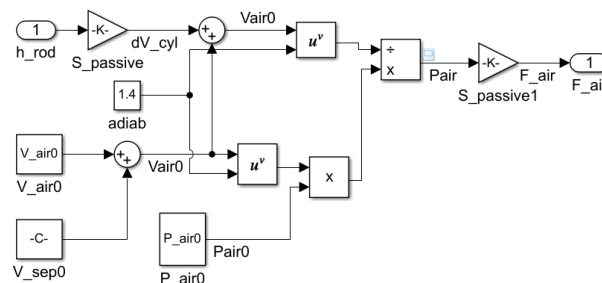


Рис. 4. Модель пневмогидравтеснителя

ну, обычно большую постоянную времени. Реализуется такой способ введением рассчитанного П-регулятора. Второй способ – это синтез ПД-регулятора, который позволяет скомпенсировать обе постоянных времени.

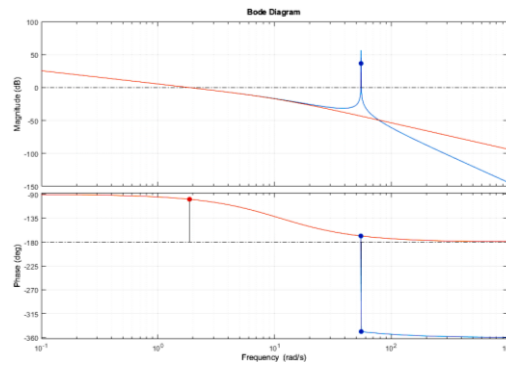


Рис. 7. Частотные характеристики системы

Поскольку синтез и реализация П-регулятора значительно проще и требуется компенсация только одной постоянной времени, то для коррекции системы был выбран П-регулятор. Более того, введение дифференцирующей составляющей негативно сказывается на колебательности давления в полостях активного гидроцилиндра.

При моделировании системы управления выбрано самое сложное возмущающее воздействие, имеющее максимальную амплитуду и частоту $dist(t) = 0.8 \sin 2\pi/5.4$. Модель полученной системы с П-регулятором представлена на рис. 8.

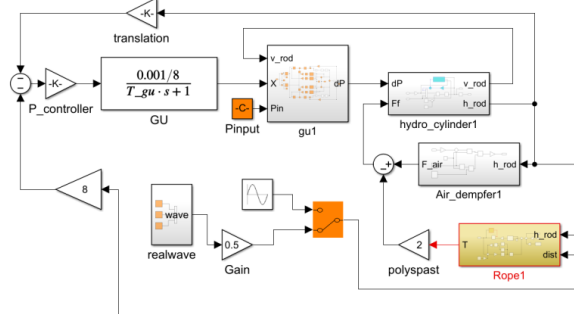


Рис. 8. Модель системы с П-регулятором

Перемещение объекта 1 при моделировании полученной системы управления приведено на рис. 9. На рис. 10 показан график давлений в полостях активного гидроцилиндра.

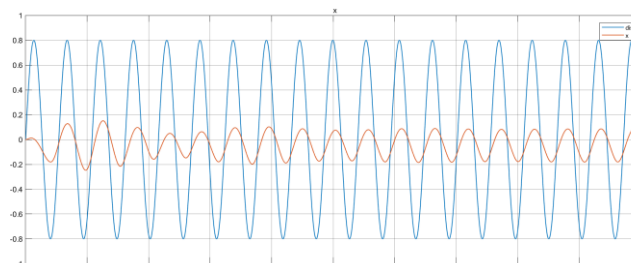


Рис. 9. Результаты моделирования системы с П-регулятором

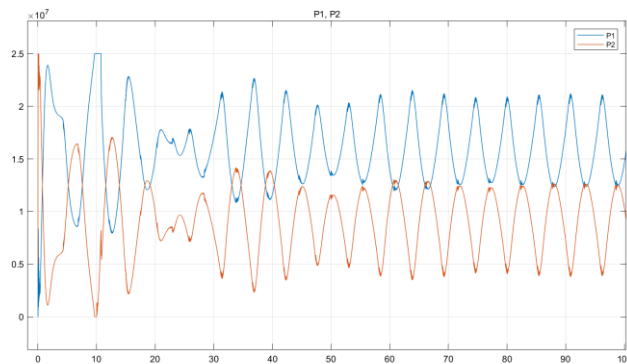


Рис. 10. График давлений в полостях активного гидроцилиндра

Реакция системы на сложное гармоническое колебание приведена на рис. 11.

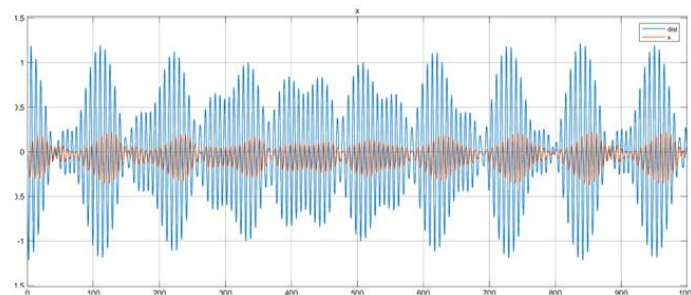


Рис. 11. Результаты моделирования системы с П-регулятором при сложном гармоническом воздействии

Видно, что после завершения переходного процесса объекта 1, колебания его положения не превышают 50 см, что превышает требуемое значение. При этом, колебания при отработке гармонического воздействия постоянной частоты не превышает 15 см. Поэтому необходимо рассмотреть методы повышения инвариантности системы по отношению ко входному сигналу.

Повышение инвариантности системы. Основным методом, используемым при построении инвариантных систем в случае измеримых возмущений, является применение так называемого комбинированного управления, когда, наряду с управлением по отклонению, используется управление по возмущающему воздействию. Идея метода приведена на рис. 12.

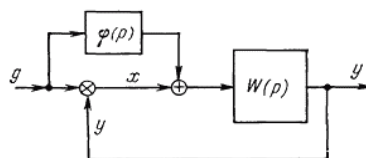


Рис. 12. Идея комбинированного управления

Для получения условия полной инвариантности системы управления, следует принять

$$\varphi(s) = \frac{1}{W(s)}. \quad (5)$$

Модель инвариантной системы представлена на рис. 13.

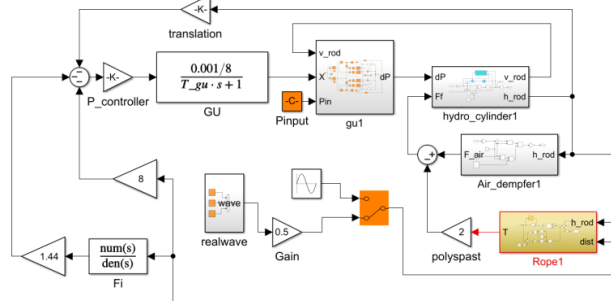


Рис. 13. Модель инвариантной системы

Часто при решении приведенной задачи возникает вопрос физической реализуемости такого корректирующего устройства. Это связано с тем, что у передаточной функции $\varphi(s)$ порядок числителя становится больше знаменателя. Однако в нашем случае в качестве датчика обратной связи применяется акселерометр, который дает сигнал пропорционально второй производной перемещения корабля, и поэтому нет необходимости введения численных вторых производных, и проблем с физической нереализуемостью не возникает.

По результатам моделирования получим графики переходных процессов положения объекта 1 (рис. 14) и давления в полостях активного гидроцилиндра (рис. 15) при сложном гармоническом воздействии. Время моделирования составило 500 с.

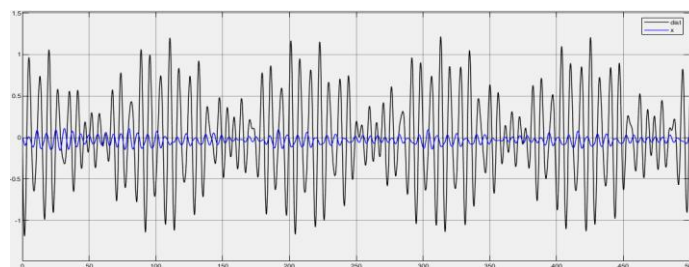


Рис. 14. Результаты моделирования инвариантной системы при сложном гармоническом воздействии

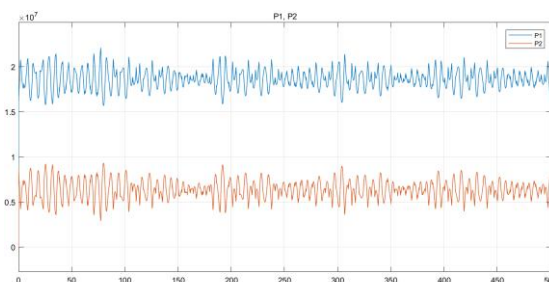


Рис. 15. Давление в полостях активного гидроцилиндра инвариантной системы при сложном гармоническом воздействии

Из рис. 14 видно, что реакция инвариантной системы уже на сложное гармоническое воздействие не превышает 15 см.

$$W(s) = \frac{k_{o6} \cdot k_p}{T_2 s(T_1 s + 1)} = \frac{0.0706 \cdot 2.95}{s(T_{aus} s + 1)} = \frac{0.2083 = K}{s(0.15s + 1)}. \quad (6)$$

Для получения условия полной инвариантности системы управления, следует принять

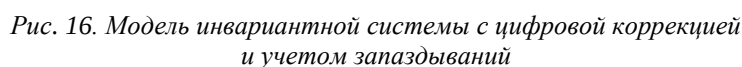
Такое звено является физически нереализуемым, поэтому при моделировании на первом этапе можно ввести в знаменатель колебательное звено 2-го порядка с малой постоянной времени T_d .

Задача цифрового перепроектирования широко освещена в литературе, поэтому перепроектируя по методу Тастина ($s = \frac{2z-1}{T_0 z+1}$) получим

При $T_0 = T_d = 0.05, T_{qu} = 0.09$ получим

$k_{fi} = \frac{1}{K} = 4.8$, что значительно. Это связано с тем, что номинальный перепад давления взят $\Delta P = 50$ атм, по факту же перепад может быть больше, особенно при малых массах объекта 1. Поэтому k_{fi} следует уменьшить примерно в 2 раза. В системе подобран коэффициент в 1.44.

Модель инвариантной системы с цифровой коррекцией и учетом запаздываний представлена на рис. 16.



По результатам моделирования получим графики переходных процессов положения объекта 1 (рис. 17) и давления в полостях активного гидроцилиндра (рис. 18) при сложном гармоническом воздействии. Время моделирования составило 500 с.

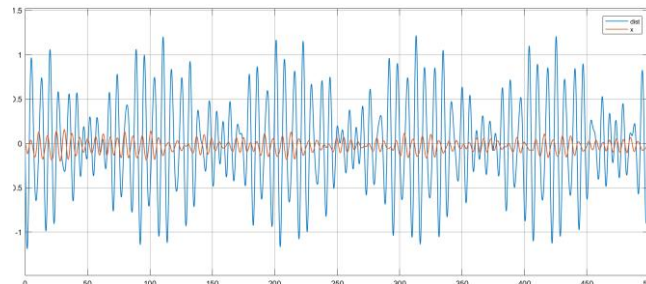


Рис. 17. Результаты моделирования цифровой инвариантной системы при сложном гармоническом воздействии

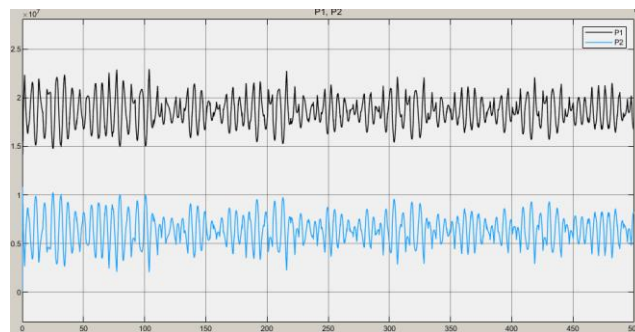


Рис. 18. Давление в полостях активного гидроцилиндра цифровой инвариантной системы при сложном гармоническом воздействии

Заключение. В результате синтеза получена инвариантная система регулирования, причем введение блока компенсации реализуемо, поскольку основным датчиком обратной связи является акселерометр. При этом в контуре главной обратной связи используется корректирующий ПИ-регулятор. Цифровое перепроектирование корректирующих устройств проведено с применением билинейной аппроксимации.

Поскольку гидравлическая система стабилизации подводного объекта отличается наличием задержек по времени, вызванных аналого-цифровым преобразованием, при выборе периода дискретизации цифровой части системы учитывалось время выполнения программы и частота работы датчиков обратной связи.

С учетом изложенных особенностей объекта регулирования в результате разработки удалось получить качественную систему стабилизации, применив при этом достаточно простые и широко распространенные методы цифрового перепроектирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гамынин Н.С. Гидравлический привод систем управления. – М.: Машиностроение, 1972. – 376 с.
2. Тран В.Т., Кориков А.М., Нгуен Т.Т. Моделирование гидравлической системы автоматической стабилизации // Электронные средства и системы управления: Матер. докладов Международной научно-практической конференции. – 2021. – № 1-2. – С. 85-88.
3. Игамбердиев К.А. Математическое моделирование стабилизации гидропривода с нелинейной нагрузкой // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2019. – № 3 (21). – С. 30-39.

4. *Воронов Д.Ю.* Гидроцилиндры: учеб.-метод. пособие. – Тольятти: ТГУ, 2011. – 72 с.
5. *Pan M., Johnston N., Plummer A.* Theoretical and experimental studies of a switched inertance hydraulic system // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. – Vol. 228, Issue 1. – P. 12-25.
6. *Кудрявцев Д.С., Яковлев А.А., Чернусь Петр П., Чернусь Павел П., Сахабудинов Р.В., Голосий А.С.* Обеспечение функционирования робототехнической системы «автономный глубоководный аппарат» в режиме активной компенсации качки // *Тр. 33-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника»*, 29-30 сентября 2022 г. – СПб.: Изд-во: ЦНИИ РТК, 2022. – С. 295-307.
7. *Черный Г.Г.* Газовая динамика: учебник для университетов и вузов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 424 с.
8. *Лебедева Н.А.* Моделирование колебаний температуры в гидравлической системе с перепуском топлива // *Вопросы науки*. – 2015. – Т. 7. – С. 11-15.
9. *Knežević D., Savić V.* Mathematical modeling of changing of dynamic viscosity, as a function of temperature and pressure, of mineral oils for hydraulic systems // *Facta universitatis - series: Mechanical Engineering*. – 2006. – Vol. 4, br. 1. – P. 27-34.
10. *Helian V., Chen Z., Yao B., Lyu L.* Accurate motion control of a direct-drive hydraulic system with an adaptive nonlinear pump flow compensation // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. – Oct. 2021. – Vol. 26, No. 5. – P. 2593-2603. DOI: 10.1109/TMECH.2020.3043576.
11. *Coskun G., Kolcuoglu T., Dogramac T.* Analysis of a priority flow control valve with hydraulic system simulation model // *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* – 2017. – Vol. 39. – P. 1597-1605.
12. *Рыбак А.Т., Ляхницкая О.В.* Моделирование приводов технологических машин с учётом объёмной жёсткости их гидравлических систем // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. – 2015. – Т. 3, № 9-3 (20-3). – С. 271-276.
13. *Герман-Галкин С.Г.* Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
14. *Колисниченко А.С., Струтинская Е.В.* Использование программного пакета Simulink для имитационного моделирования гидравлической системы // *Новые технологии – нефтегазовому региону: Матер. Международной научно-практической конференции*. – 2016. – С. 86-88.
15. *Çetin Ş., Akkaya A.V.* Simulation and hybrid fuzzy-PID control for positioning of a hydraulic system // *Nonlinear Dynamics*. – 2010. – Vol. 61. – P. 465-476.
16. *Chalupa P., Novák J.* Modeling and model predictive control of a nonlinear hydraulic system // *Elsevier, Computers & Mathematics with Applications*. – August 2013. – Vol. 66, Issue 2. – P. 155-164.
17. *Плыкина Е.В.* Цифровой алгоритм управления гидроприводом с золотниковым распределителем // *Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов*. – 2020. – № 18. – P. 166-174.
18. *Нечаев Ю.М., Никущенко Д.В.* Нечеткая формальная система управления моделированием нестационарной динамики подводных объектов // *XXIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям*. – 2020. – Т. 1. – С. 174-176.
19. *Shi Z., Gu F., Lennox B., Ball A.D.* The development of an adaptive threshold for model-based fault detection of a nonlinear electro-hydraulic system // *Control Engineering Practice*. – November 2005. – Vol. 13, Issue 11. – P. 1357-1367.
20. *Huang K., Wu S., Li F., Yang C.* Fault diagnosis of hydraulic systems based on deep learning model with mutilate data samples // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. – November 2022. – Vol. 33, Issue 11.
21. *Feng H., Yin C., Ma W., Yu H., Cao D.* Parameters identification and trajectory control for a hydraulic system // *ISA Transactions*. – September 2019. – Vol. 92. – P. 228-240.

REFERENCES

1. *Gamynin N.S.* *Gidravlicheskiy privod sistem upravleniya* [Hydraulic drive of control systems]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1972, 376 p.
2. *Tran V.T., Korikov A.M., Nguen T.T.* Modelirovanie gidravlicheskoj sistemy avtomaticheskoy stabilizatsii [Modeling of the hydraulic system of automatic stabilization], *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya: Mater. dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Electronic means and control systems: Materials of reports of the International scientific-practical conference], 2021, No. 1-2, pp. 85-88.

3. Igamberdiev K.A. Matematicheskoe modelirovanie stabilizatsii gidroprivoda s nelineynoy nagruzkoy [Mathematical modeling of the stabilization of a hydraulic drive with a nonlinear load], *Problemy vychislitel'noy i prikladnoy matematiki* [Problems of Computational and Applied Mathematics], 2019, No. 3 (21), pp. 30-39.
4. Voronov D.Yu. Gidrotsilindry: ucheb.-metod. posobie [Hydraulic cylinders: textbook-method. Allowance]. Tol'yatti: TGU, 2011, 72 p.
5. Pan M., Johnston N., Plummer A. Theoretical and experimental studies of a switched inertance hydraulic system, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, Vol. 228, Issue 1, pp. 12-25.
6. Kudryavtsev D.S., Yakovlev A.A., Chernus' Petr P., Chernus' Pavel P., Sakhabudinov R.V., Golosiy A.S. Obespechenie funktsionirovaniya robototekhnicheskoy sistemy «avtonomnyy glubokovodnyy apparat» v rezhime aktivnoy kompensatsii kachki [Ensuring the functioning of the robotic system "autonomous deep-sea vehicle" in the mode of active roll compensation], *Tr. 33-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Ekstremal'naya robototekhnika», 29-30 sentyabrya 2022 g.* [Proceedings of the 33rd International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics", September 29-30, 2022]. St. Petersburg: Izd-vo: TSNII RTK, 2022, pp. 295-307.
7. Chernyy G.G. Gazovaya dinamika: uchebnik dlya universitetov i vtuzov [Gas dynamics: A textbook for universities and colleges]. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1988, 424 p.
8. Lebedeva N.A. Modelirovanie kolebaniy temperatury v gidravlicheskoj sisteme s perepuskom topliva [Modeling of temperature fluctuations in a hydraulic system with fuel bypass], *Voprosy nauki* [Questions of science], 2015, Vol. 7, pp. 11-15.
9. Knežević D., Savić V. Mathematical modeling of changing of dynamic viscosity, as a function of temperature and pressure, of mineral oils for hydraulic systems, *Facta universitatis - series: Mechanical Engineering*, 2006, Vol. 4, br. 1, pp. 27-34.
10. Helian V., Chen Z., Yao B., Lyu L. Accurate motion control of a direct-drive hydraulic system with an adaptive nonlinear pump flow compensation, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Oct. 2021, Vol. 26, No. 5, pp. 2593-2603. DOI: 10.1109/TMECH.2020.3043576.
11. Coskun G., Kolcuoglu T., Dogramac T. Analysis of a priority flow control valve with hydraulic system simulation model, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2017, Vol. 39, pp. 1597-1605.
12. Rybak A.T., Lyakhnitskaya O.V. Modelirovanie privodov tekhnologicheskikh mashin s uchedom ob'emnoy zhestkosti ikh gidravlicheskikh sistem [Modeling of drives of technological machines taking into account the volumetric rigidity of their hydraulic systems], *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2015, Vol. 3, No. 9-3 (20-3), pp. 271-276.
13. German-Galkin S.G. Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v MATLAB 6.0 [Computer modeling of semiconductor systems in MATLAB 6.0]. St. Petersburg: KORONA print, 2001, 320 p.
14. Kolisnichenko A.S., Strutinskaya E.V. Ispol'zovanie programmnoy paketa Simulink dlya imitatsionnogo modelirovaniya gidravlicheskoy sistemy [Using the Simulink software package for hydraulic system simulation], *Novye tekhnologii – neftegazovomu regionu: Mater. Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [New technologies for the oil and gas region. materials of the International scientific-practical conference], 2016, pp. 86-88.
15. Çetin Ş., Akkaya A.V. Simulation and hybrid fuzzy-PID control for positioning of a hydraulic system, *Nonlinear Dynamics*, 2010, Vol. 61, pp. 465-476.
16. Chalupa P., Novák J. Modeling and model predictive control of a nonlinear hydraulic system, *Elsevier, Computers & Mathematics with Applications*, August 2013, Vol. 66, Issue 2, pp. 155-164.
17. Plykina E.V. Tsifrovoy algoritim upravleniya gidroprivodom s zolotnikovym raspredelitelem [Digital control algorithm for a hydraulic drive with a spool valve], *Tekhnika XXI veka glazami molodykh uchenykh i spetsialistov* [Technology of the XXI century through the eyes of young scientists and specialists], 2020, No. 18, pp. 166-174.
18. Nechaev Yu.M., Nikushchenko D.V. Nechetkaya formal'naya sistema upravleniya modelirovaniem nestatsionarnoy dinamiki podvodnykh ob"ektov [Fuzzy formal control system for modeling the unsteady dynamics of underwater objects], *XXIII Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam* [XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements], 2020, Vol. 1, pp. 174-176.
19. Shi Z., Gu F., Lennox B., Ball A.D. The development of an adaptive threshold for model-based fault detection of a nonlinear electro-hydraulic system, *Control Engineering Practice*, November 2005, Vol. 13, Issue 11, pp. 1357-1367.

20. Huang K., Wu S., Li F., Yang C. Fault diagnosis of hydraulic systems based on deep learning model with mutilate data samples, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, November 2022, Vol. 33, Issue 11.
21. Feng H., Yin C., Ma W., Yu H., Cao D. Parameters identification and trajectory control for a hydraulic system, *ISA Transactions*, September 2019, Vol. 92, pp. 228-240.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.П. Ковалев.

Чернусь Петр Павлович – БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова; e-mail: petr.chernus@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78124900518; к.т.н.; доцент.

Чернусь Павел Павлович – e-mail: pavel.chernus@yandex.ru; тел.: +78124900518; к.т.н.; доцент.

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

Сахабудинов Роман Владиславович – e-mail: srv@kbarsenal.ru; тел.: +79211852881; к.т.н.; коммерческий директор.

Голосий Александр Сергеевич – e-mail: as.golosiy@kbarsenal.ru; тел.: +79213025903; к.т.н.; советник.

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

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

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

Sakhbudinov Roman Vladislavovich – e-mail: srv@kbarsenal.ru; phone: +79211852881; cand. of eng. sc; commercial director.

Golosiy Aleksandr Sergeevich – e-mail: as.golosiy@kbarsenal.ru; phone: +79213025903; cand. of eng. sc.; adviser.

УДК 629.3.051

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-31-40

И.А. Шипов, Е.В. Ветошкин

ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСИРОВАННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НАЗЕМНОГО ОБЪЕКТА

Цель работы – создание эффективной программно-аппаратной модели навигационной системы наземного подвижного объекта. Процесс моделирования является одним из ключевых инструментов, позволяющих проводить отработку технических решений на всех этапах жизненного цикла сложной технической системы. В процессе проектирования комплексированных инерциальных систем возникает ряд научно-технических задач, эффективность решения которых зависит от степени их отработки. Моделирование – один из вариантов апробации технических решений. В статье приведено описание решения задачи моделирования комплексированной инерциальной навигационной системы наземного объекта. Модель навигационной системы, описанная в данной работе, является программно-аппаратной и реализована в виде программных модулей, поддерживающих аппаратное взаимодействие друг с другом. Описанная система моделирования навигационной системы наземного объекта была разработана в рамках ряда опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ. Сформированная модель навигационной системы наземного подвижного объекта включает в себя несколько про-