

20. Kravchenko D.Yu., Kravchenko Yu.A., Mansur A.M., Mokhammad Zh.Kh. Metod avtomaticheskogo izvlecheniya klyuchevykh slov [Method for automatic extraction of keywords], *Tr. mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo kongressa «Intellectual'nye sistemy i informatsionnye tekhnologii – 2022» («IS & IT-2022», «IS&IT'22»)* [Proceedings of the international scientific and technical congress “Intelligent systems and information technologies - 2022” (“IS & IT-2022”, “IS&IT'22”)]. Vol. 1. Scientific publication. Taganrog: Izd-vo Stupina S.A., 2022, pp. 90-97.
21. Kravchenko D.Yu., Kravchenko Yu.A., Mansur A.M., Mokhammad Zh.Kh. Modifitsirovannyi metod postroeniya semanticheskogo predstavleniya teksta na osnove metodov klasterizatsii i vzhivaniya terminov [A modified method for constructing a semantic representation of text based on clustering and term weighting methods], *Tr. XII mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tekhnologii razrabotki informatsionnykh sistem (TIS -2022)»* [Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference “Information Systems Development Technologies (TRIS-2022)”]. Taganrog: 2022, pp. 94-100.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. С.Г. Буланов.

Кравченко Даниил Юрьевич – Южный федеральный университет; e-mail: dkravchenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

Kravchenko Daniil Yurievich – Southern Federal University; e-mail: dkravchenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design, postgraduate.

УДК 621.337.11:004.942:519.876.5

DOI 10.18522/2311-3103-2024-2-50-59

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

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСА ПОДЪЕМА ПОДВОДНОГО ГРУЗА

Для транспортировки подводного груза применяется судно-носитель (СН). Судно носитель оснащается комплексом подъема подводного груза, предназначенным для захвата груза, его подъема, закрепления на СН и транспортировки к пункту базирования. Комплекс подъема подводного груза включает: спускаемый модуль, механизм подъема, механизм фиксации, механизм демпфирования и систему управления. В статье представлены результаты разработки математической модели подводного груза, который описан на основании теорем об изменении количества движения и кинетического момента механической системы. В уравнениях линейного и углового перемещений груза присутствует присоединенная к нему масса жидкости. С учётом относительно малых линейных и угловых скоростей, а также малых углов вращения выполнена линеаризация уравнения динамики в скалярном виде. Модель груза реализована в стандартных блоках системы имитационного моделирования. Для синтеза системы управления груз представлен передаточной функцией в виде апериодического звена второго порядка. В работе синтезирован трехконтурный подчиненный регулятор груза с обратными связями по положению, по скорости и по току. Получены выражения для расчёта обобщённых динамических характеристик замкнутой систем второго порядка в зависимости от относительного коэффициента усиления регулятора, рассчитаны параметры системы. Исследования, проведенные на математических моделях системы, позволили получить начальные сведения о линейном и угловом перемещении спускаемого модуля в установившемся режиме, перемещении точек внешнего и внутреннего подвесов, величине силы на тросах, о моменте и скорости, развиваемых электродвигателями лебедок. Моделирование режимов спуска, стабилизации и подъема позволили скорректировать параметры оборудования и добиться удовлетворительных результатов функционирования комплекса.

Моделирование; подводный груз; масса; инерция; кинетический момент; качка; линеаризация; система управления; передаточная функция; замкнутый контур; Пи-регулятор.

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

SYNTHESIS OF THE UNDERWATER CARGO LIFTING COMPLEX CONTROL SYSTEM

A carrier vessel is used to transport an underwater cargo. The given vessel is equipped with a unit for lifting underwater cargoes designed to capture it, lift it, secure it on the vessel and transport it to the base point. The given unit includes the following components: the descent module, the lifting mechanism, the locking mechanism, the damping mechanism and the control system. The paper presents the findings of the mathematical model development of the main components for the unit to make a crucial contribution to obtaining reliable results – an underwater cargo, an asynchronous motor, a cable suspension and a compensation mechanism. The underwater cargo is described based on the theorems about the change in the amount of motion and kinetic moment of the mechanical system. In the equations of linear and angular displacement of a cargo, there is a mass of liquid in it. The cable suspension model takes into account its deformation in motion while operating. The model of an asynchronous motor with a short-circuited rotor is obtained from a generalized circuit. A vector control method is provided, the rotor flow coupling vector is taken as the base vector. The compensation mechanism model is based on an adiabatic process in a macroscopic system, where there is no heat released into. For the control system synthesis, the cargo is represented by a transfer function in the form of an aperiodic link of the second order. There is a three-loop PID controller synthesized with feedback in position, speed and current. Equations are obtained for calculating the generalized dynamic characteristics of a closed second-order system, and the controller parameters are calculated. The findings carried out on mathematical models of the system help us to obtain initial information about the linear and angular displacement of the descent module in steady state, the movement of points of external and internal suspensions, the magnitude of the force on the cables, the torque and speed developed by electric motors of winches. Modeling of descent, stabilization and ascent modes made it possible to adjust the parameters of the equipment and achieve satisfactory results of the complex's operation.

Modeling; underwater cargo; mass; inertia; kinetic moment; pitching; linearization; control system; transfer attribute; closed loop; proportional integral (PI) controller.

Введение. Схема механизма подъема основана на применении тросовых лебедок; четыре точки подвеса тросовых систем размещены в диаметральной плоскости судна-носителя (рис. 1). Здесь T1, T2, T3, T4 – точки подвеса груза.

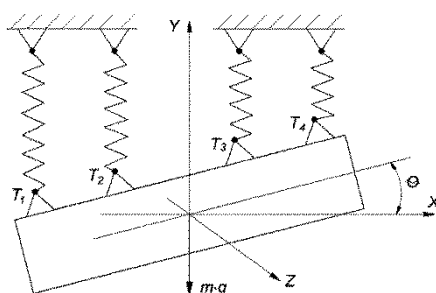


Рис. 1. Расположение точек подвеса и осей координат груза

Математическая модель груза. Динамика твердого тела может быть описана следующими уравнениями

$$\frac{\delta Q}{\delta t} + \omega \times Q = \sum_i F_i, \quad (1)$$

$$\frac{\delta K_O}{\delta t} + V \times Q + \omega \times K_O = \sum_i \rho_i \times F_i, \quad (2)$$

где Q – вектор количества движения механической системы; K_O – вектор кинетического момента механической системы относительно подвижного центра O ; $\frac{\delta Q}{\delta t}, \frac{\delta K_O}{\delta t}$ – производные векторов Q и K_O относительно подвижной системы координат $OXYZ$; V – вектор скорости подвижного центра O ; ω – вектор угловой скорости системы $OXYZ$; $\sum_i F_i, \sum_i \rho_i \times F_i$ – векторы суммарных силы и момента относительно центра O от всех внешних сил, действующих на систему [1].

Векторы Q количества движения и K_O кинетического момента твёрдого тела относительно подвижного центра O определяются в соответствии с выражениями

$$Q = mV + m\omega \times \rho_c, \quad (3)$$

$$K_O = m\rho_c \times V + J\omega, \quad (4)$$

где J – тензор инерции твёрдого тела.

Сила, приводящая груз в движение, должна перемещать не только сам груз, но и некоторое количество присоединенной жидкости вслед за ним [2, 3]. Аналогичная ситуация возникает и при вращении подводного груза [4]. Присоединенные массы и моменты инерции зависят от геометрии подводного груза [5]. Объединенные в симметрическую матрицу они имеют вид:

$$\lambda = \{\lambda_{ij}; i, j = 1, \dots, 6\}. \quad (5)$$

Тогда уравнения для количества движения и кинетического момента примут вид:

$$Q = mV + m\omega \times \rho_c + \sum_{i=1}^3 (\lambda_i, x) e_i, \quad (6)$$

$$K_O = m\rho_c \times V + J\omega + \sum_{i=1}^3 (\lambda_{i+3}, x) e_i, \quad (7)$$

где $x = (V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ – вектор кинематических параметров движения, спроецированных на оси связанной системы координат; λ_i – i -я строка матрицы λ ; (λ_i, x) – скалярное произведение векторов λ_i и x ; e_i – орты связанной системы координат. Следует отметить, что векторы Q и K_O являются линейными формами вектора X

$$Q = A_Q \cdot x, \quad (8)$$

$$K_O = A_K \cdot x, \quad (9)$$

где

$$A_Q = \begin{pmatrix} m + \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & \lambda_{14} & mz_c + \lambda_{15} & -m\gamma_c + \lambda_{16} \\ \lambda_{21} & m + \lambda_{22} & \lambda_{23} & -mz_c + \lambda_{24} & \lambda_{25} & mx_c + \lambda_{26} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & m + \lambda_{33} & m\gamma_c + \lambda_{34} & -mx_c + \lambda_{25} & \lambda_{26} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$A_K = \begin{pmatrix} \lambda_{41} & -mz_c + \lambda_{42} & m\gamma_c + \lambda_{43} & J_{xx} + \lambda_{44} & -J_{xy} + \lambda_{45} & -J_{xz} + \lambda_{46} \\ mz_c + \lambda_{51} & \lambda_{52} & -mx_c + \lambda_{53} & -J_{yx} + \lambda_{54} & J_{yy} + \lambda_{55} & -J_{yz} + \lambda_{56} \\ -m\gamma_c + \lambda_{61} & mx_c + \lambda_{62} & \lambda_{63} & -J_{zx} + \lambda_{64} & -J_{zy} + \lambda_{65} & J_{zz} + \lambda_{66} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

В итоге имеет место следующая система уравнений

$$A_Q \frac{dx}{dt} = \sum_i F_i - \omega \times (A_Q x), \quad (12)$$

$$A_K \frac{dx}{dt} = \sum_i \rho_i \times F_i - V \times (A_Q x) - \omega \times (A_K x). \quad (13)$$

После преобразований, а также с учетом только перемещений вертикально вверх и вращения вокруг оси Z уравнения динамики в скалярном виде имеют вид

$$(m + \lambda_{22})\dot{v}_y + \lambda_{26}\dot{\omega}_z = \frac{c\gamma\rho v_y^2}{2} S + A - G + F_{By} + m\gamma\omega_z^2, \quad (14)$$

$$(J_{zz} + \lambda_{66})\dot{\omega}_z + \lambda_{26}\dot{v}_y = \frac{c\gamma\rho v_y^2}{2} SL + \gamma_c G \sin \theta - M_{Bz} - m\gamma\omega_z v_y. \quad (15)$$

Проводя линеаризацию с учётом малых линейных и угловых скоростей, малых углов, получена следующая модель груза, представленная в стандартных блоках системы имитационного блочного моделирования MATLAB Simulink (рис. 2).

Синтез системы управления. Основным преимуществом подчиненной структуры является возможность компенсации возмущений на груз регулирования, которые могут быть вызваны, как внешними воздействиями (температура, напряжение питания, момент нагрузки и т.д.), так и внутренними перекрестными связями в многомерных системах. В дальнейшем рассматривается обобщенный ПИД-регулятор с реальным дифференцирующим звеном, передаточная функция которого определяется выражением

$$W_P(s) = k_{\Pi} + \frac{k_{\text{И}}}{s} + \frac{k_{D S}}{T_{D S} s + 1}. \quad (16)$$

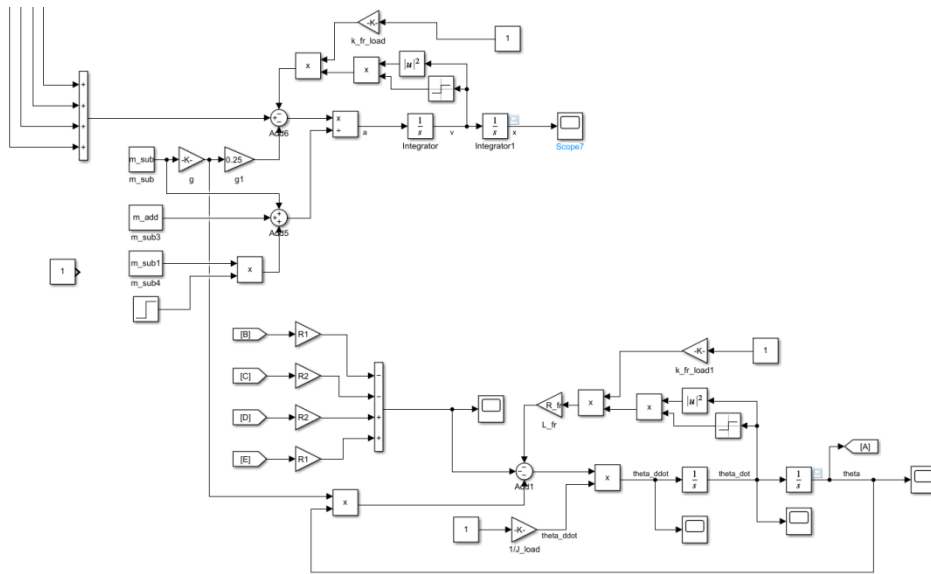


Рис. 2. Модель груза

Синтез осуществлялся по так называемой стандартной методике [13, 17]. Суть данного подхода заключается в следующем. Синтез регуляторов проводится по контурам, в которых передаточная функция груза представляется звеном второго порядка, цель которого – обеспечить замкнутому контуру требуемые динамические характеристики. Например, если передаточная функция замкнутого контура имеет вид

$$W(s) = \frac{b_0}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2}, \quad (17)$$

где $\xi = 0,707$, то она называется оптимумом по модулю и доставляет минимум интегральному критерию от ошибки регулирования и дает перерегулирование $\sigma = 4,3\%$:

$$I_{ITAE} = \int_0^{\infty} t \cdot e(t) dt, \quad (18)$$

Рассмотрим подробнее упрощённую модель асинхронной машины с короткозамкнутым ротором [6–11], и определимся с выбором типов регуляторов [14–16, 18, 19] (рис. 3).

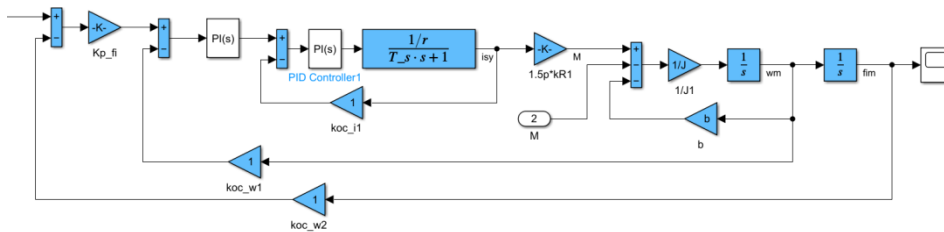


Рис. 3. Передаточная функция эквивалентной схемы

Токовый контур имеет передаточную функцию

$$W_{\text{рази}} = \frac{1/r}{T_s \cdot s + 1} = \frac{29}{0,032s + 1}. \quad (19)$$

Для коррекции применим ПИ-регулятор [20], рассчитанный по стандартной методике [13], в целях компенсации большей постоянной времени. Соотношение параметров

$$\frac{k_p}{k_i} = T_s \quad (20)$$

Примем $k_i = 5$, $k_p = 0,16$. Тогда передаточная функция токового контура

$$W_i = \frac{5(0,032s+1)}{s} \cdot \frac{29}{0,032s+1} = \frac{145}{s}. \quad (21)$$

Замкнутая передаточная функция токового контура

$$W_{i\text{зам}} = \frac{145}{s+145} = \frac{1}{0,007s+1}. \quad (22)$$

В свою очередь, скоростной контур имеет следующую передаточную функцию

$$W_{\text{раз}\omega} = \frac{1}{0,007 \cdot s+1} \cdot \frac{\frac{1}{b}}{\frac{J}{b} \cdot s+1} = \frac{1}{0,007 \cdot s+1} \cdot \frac{79}{80 \cdot s+1}. \quad (23)$$

Выберем $\xi = 1$. Тогда переходной процесс контура будет без перерегулирования. Также применим ПИ-регулятор.

Рассчитаем систему: $\omega_0 = 101$; $k_{p\omega} = 71,4$; $k_{i\omega} = 0,89$.

$$W_{\text{зам}\omega} = \frac{\frac{1}{k_{oc}}}{\frac{1}{\omega_0^2} \cdot s^2 + \frac{2 \cdot \xi}{\omega_0} \cdot s + 1} \approx \frac{1}{0,014 \cdot s+1} \quad (24)$$

Контур по положению имеет передаточную функцию

$$W_{\text{раз}\varphi} = \frac{1}{s \cdot (0,014 \cdot s+1)}. \quad (25)$$

Для контура по положению выберем $\xi = 0,707$. Тогда переходной процесс контура будет с перерегулированием в 4 %.

Рассчитаем систему: $\omega_0 = 50,5$; $k_{p\omega} = 35,7$.

Моделирование режимов функционирования. Математическая модель комплекса подъема подводного груза разработана в пакете MATLAB Simulink [12]. В общей модели присутствуют блоки, являющиеся частными моделями: асинхронного двигателя (motor), тросового подвеса, механизма компенсации, груза (cargo) – спускаемого модуля с грузом или без него, системы управления. Результаты моделирования показали следующее:

1. Выбранные параметры механизма подъёма в части мощности электродвигателя, передаточных отношений редуктора лебёдок и синтезированная система управления обеспечивают режим стабилизации при заданных параметрах качки СН и параметрах спускаемого модуля. Размах колебаний крайних точек подвеса не превосходит (0,06–0,07) м, а угловые колебания минус $0,1^\circ$. Силы в точках подвеса лежат в пределах от 120 до 160 кН (рис. 4).

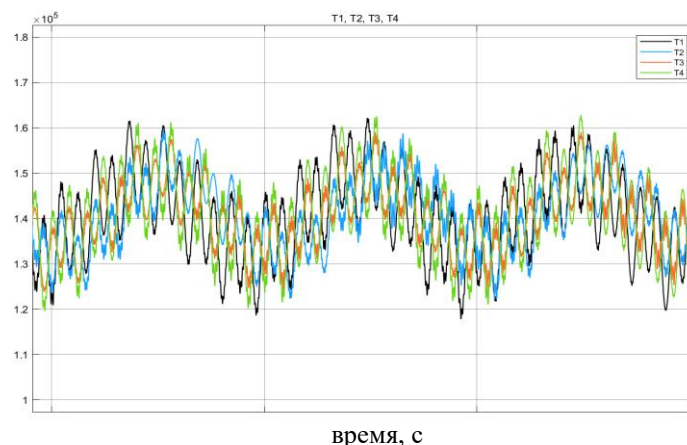


Рис. 4. Силы на тросах в установившемся режиме стабилизации

2. Режим подъема в зависимости от положения судна по отношению к вертикали волны имеет три специфические фазы (рис. 5). На спокойной воде (рис. 5,а) каретка упирается в наружный шток компенсатора и неподвижна. Натяжение тросов равно неуравновешенности груза. Скорость подъема от 0,05 до 0,10 м/с обеспечивается лебёдкой.

При волнении СН сначала взбирается на гребень волны (рис. 5,б); перемещения штока и ускорения положительны и максимальны. При этом каретка утапливает наружный шток компенсатора, полиспаст «растягивается». Усилия на тросах максимальны, груз перемещается со средней скоростью от 0,05 до 0,10 м/с.

В фазе спуска во впадину волны (рис. 5,в) перемещения штока и ускорения также максимальны, но с отрицательным знаком. Внутренний шток компенсатора выдвигается, каретка отодвигается, полиспаст «сжимается». Усилие на тросах минимально, груз перемещается с практически постоянной скоростью.

В процессе моделирования режима подъема были уточнены параметры механизма компенсации – снижено начальное давление (до 6 МПа) и уменьшен диаметр наружного поршня.

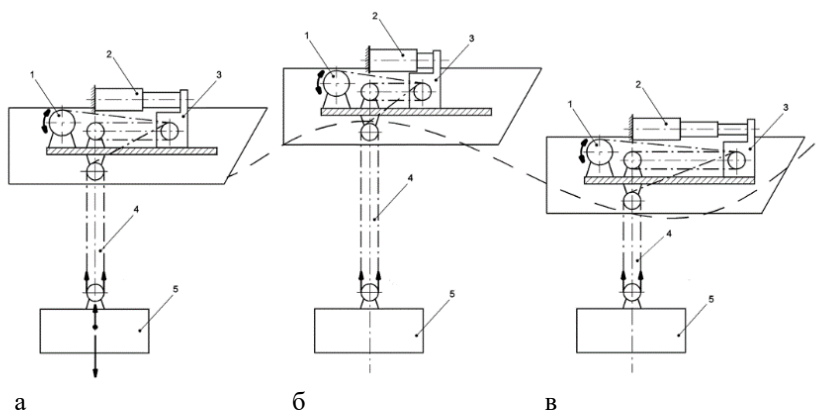


Рис. 5. Схема работы в режиме подъема: 1 – лебедка; 2 – гидроцилиндр; 3 – каретка; 4 – полиспаст; 5 – груз

В результате, в режиме свободного подъема наблюдается незначительное колебание средней скорости от 0,05 до 0,15 м/с (рис. 6) при заданных ходах кареток механизмов компенсации $\pm 1,5$ м. При подъеме наблюдается увеличение угловых колебаний спускаемого модуля, но их величина не превосходит 1° , что можно считать допустимым. Провисания тросов не происходит, усилия на узлах подвеса не превышают 270 кН (рис. 7).

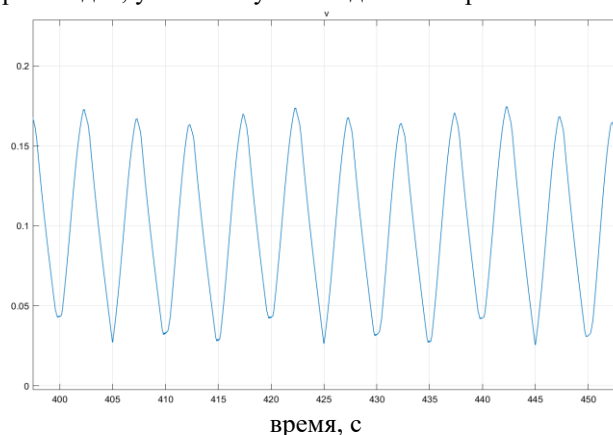


Рис. 6. Колебания скорости центра тяжести СМ в режиме подъема

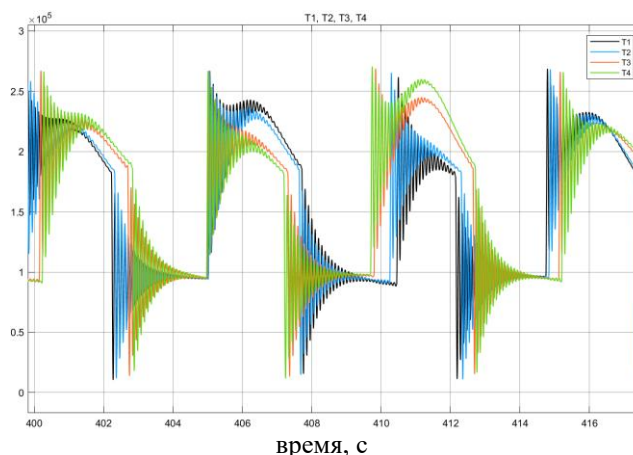


Рис. 7. Силы, действующие в точках подвеса СМ в режиме подъёма

3. Режим спуска является наиболее сложным для системы. Это связано с тем, что в режиме спуска груз обладает повышенными динамическими характеристиками по сравнению с режимом подъёма, а приведённая масса компенсатора достаточно велика. Поэтому наблюдается сдвиг по фазе реакции груза и компенсатора, что приводит к увеличению амплитуды колебаний. Кроме этого отсутствие стабилизации на спуске приводит к выходу на ограничение в 2 м компенсатора и, как следствие, наблюдаются удары гидrocилиндров компенсатора в упоры, что требует введения демпфирующих устройств.

Для исключения рывков и провисов тросов введена стабилизация (режим управляемого спуска). При управляемом спуске механизм компенсации не работает, максимальные обороты электродвигателей лебёдок не превосходят 1250 об/мин (рис. 8).

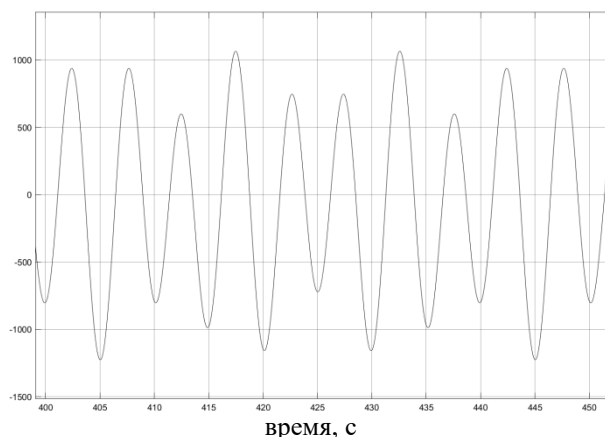


Рис. 8. Обороты ротора ЭД крайней лебёдки в режиме управляемого спуска

4. Выбранные параметры механизма подъёма имеют определенные резервы по увеличению массы спускаемого модуля или увеличению допустимой амплитуды качки на 20–25%.

Заключение. Для комплекса подъема подводного груза синтезирована система управления, в контурах обратной связи которой применены корректирующие ПИ-регуляторы. В модели объекта управления учтены силы и моменты, действующие на груз, в том числе масса присоединенной к грузу жидкости. В выражениях обобщённых динамических характеристик замкнутой системы второго порядка в зависимости от относительного коэффициента усиления регулятора, рассчитаны его параметры.

Имитационное моделирование позволило оценить динамические характеристики замкнутой системы при ее функционировании во всех режимах работы. Поскольку гидравлическая система подъема включает тросовую систему, проведены исследования на модели предельных усилий в наиболее напряженных режимах и анализ колебательных процессов спускаемого модуля. Для электропривода на базе асинхронного двигателя оценены предельные обороты вращения ротора.

В целом контур управления объектом с механизмом подъема подтвердил работоспособность, реализуемость и приемлемые характеристики как на основных, так и на дополнительных режимах функционирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никущенко Д.В. К вопросу о выборе системы координат при исследовании динамики подводных грузов // Морские интеллектуальные технологии. – 2015. – Т. 1, № 2 (28). – С. 19.
2. Huang H., Tang Q., Li H. et al. Vehicle-manipulator system dynamic modeling and control for underwater autonomous manipulation // Multibody Syst Dyn. – 2017. – 41. – P. 125-147. – <https://doi.org/10.1007/s11044-016-9538-3>.
3. Sharma A.K., Saha S.K. Simplified drag modeling for the dynamics of an underwater manipulator // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2019. – Vol. 46, No. 1. – P. 40-55.
4. Куришин А.В. Комплексирование на подводном аппарате данных инерциальной навигационной системы, магнитометра и глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – М., 2016. – 144 с.
5. Chang Z. et al. Dynamics Simulation of Grasping Process of Underwater Vehicle-Manipulator System // Journal of Marine Science and Engineering. – 2021. – Vol. 9, No. 10. – P. 1131.
6. Афоничев Д.Н., Пиляев С.Н., Степин М.А. Математическая модель управляемого асинхронного электродвигателя // Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в различных режимах движения. – 2017. – С. 10-15.
7. Омельченко Е.Я. Динамические математические модели асинхронных двигателей. – 2012.
8. Кыюнг Н.С. и др. Моделирование электропривода с частотным управлением асинхронного двигателя // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 3. – С. 221-228.
9. Мещеряков В.Н. и др. Система управления частотным асинхронным синхронизированным электроприводом // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 116-126.
10. Семёнов А.С. Моделирование режимов работы асинхронного двигателя в пакете программ MATLAB // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2014. – Т. 11, № 1. – С. 51-59.
11. Ahmed A., Kaur K. Mathematical model for an asynchronous motor implemented in MATLAB // International journal of scientific & technical development. – 2023.
12. Moler C. Numerical Computing with MATLAB. Electronic ed. The MathWorks, Inc, Natick, MA, 2014.
13. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: Корона-Век, 2008. – 386 с.
14. Dogruer T., Tan N. Design of PI controller using optimization method in fractional order control systems // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51, No. 4. – P. 841-846.
15. Черный Г.Г. Газовая динамика. – М.: Наука, 1988. – 424 с.
16. Haddrell A.E. et al. Accounting for changes in particle charge, dry mass and composition occurring during studies of single levitated particles // The Journal of Physical Chemistry A. – 2012. – Vol. 116, No. 40. – P. 9941-9953.
17. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.
18. Bequette B.W. Process control: modeling, design, and simulation. – Prentice Hall Professional, 2003.
19. Bar-Kana I. Adaptive control: A simplified approach // Control and Dynamic Systems. – 2012. – Vol. 25. – P. 187-235.
20. Гайворонский С.А., Езангина Т.А. Методика выбора параметров ПИ-регулятора для интервальной системы автоматического управления // Векторы благополучия: экономика и социум. – 2012. – № 3 (4). – С. 143-147.

REFERENCES

1. *Nikushchenko D.V.* К вопросу о выборе системы координат при исследовании динамики подводных грузов [On the issue of choosing a coordinate system when studying the dynamics of underwater cargo], *Morskije intelektual'nye tekhnologii* [Marine intelligent technologies], 2015, Vol. 1, No. 2 (28), pp. 19.
2. *Huang H., Tang Q., Li H. et al.* Vehicle-manipulator system dynamic modeling and control for underwater autonomous manipulation, *Multibody Syst Dyn*, 2017, 41, pp. 125-147. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11044-016-9538-3>.
3. *Sharma A.K., Saha S.K.* Simplified drag modeling for the dynamics of an underwater manipulator, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2019, Vol. 46, No. 1, pp. 40-55.
4. *Kurshin A.V.* Kompleksirovanie na podvodnom apparate dannykh inertsiyal'noy navigatsionnoy sistemy, magnitometra i global'noy navigatsionnoy sputnikovoy sistemy GLONASS: dis. ... kand. tekhn. nauk [Integration of data from an inertial navigation system, magnetometer and global navigation satellite system GLONASS on an underwater vehicle: cand. of eng. diss.]: 05.13.01. Moscow, 2016, 144 p.
5. *Chang Z. et al.* Dynamics Simulation of Grasping Process of Underwater Vehicle-Manipulator System, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, Vol. 9, No. 10, pp. 1131.
6. *Afonichev D.N., Pilyaev S.N., Stepin M.A.* Matematicheskaya model' upravlyаемого asinkhronnogo elektrodvigatelya [Mathematical model of a controlled asynchronous electric motor], *Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya mobil'nykh energeticheskikh sredstv v razlichnykh rezhimakh dvizheniya* [Increasing the efficiency of using mobile energy vehicles in various driving modes], 2017, pp. 10-15.
7. *Omel'chenko E.Ya.* Dinamicheskie matematicheskie modeli asinkhronnykh dvigateley [Dynamic mathematical models of asynchronous motors], 2012.
8. *Kyong N.S. i dr.* Modelirovanie elektroprivoda s chastotnym upravleniem asinkhronnogo dvigatelya [Modeling of an electric drive with frequency control of an asynchronous motor], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical science], 2014, No. 3, pp. 221-228.
9. *Meshcheryakov V.N. i dr.* Sistema upravleniya chastotnym asinkhronnym sinkhronizirovannym elektropriivodom [Control system for frequency asynchronous synchronized electric drive], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [News of higher educational institutions. Energy problems], 2021, Vol. 23, No. 3, pp. 116-126.
10. *Semenov A.S.* Modelirovanie rezhimov raboty asinkhronnogo dvigatelya v pakete programm MATLAB [Modeling of operating modes of an asynchronous motor in the MATLAB software package], *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. MK Ammosova* [Bulletin of the North-Eastern Federal University named after. MK Ammosova], 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 51-59.
11. *Ahmed A., Kaur K.* Mathematical model for an asynchronous motor implemented in MATLAB, *International journal of scientific & technical development*, 2023.
12. *Moler C.* Numerical Computing with MATLAB. Electronic ed. The MathWorks, Inc, Natick, MA, 2014.
13. *German-Galkin S.G.* Matlab & Simulink. Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK [Matlab & Simulink. Design of mechatronic systems on a PC]. St. Petersburg: Korona-Vek, 2008, 386 p.
14. *Dogruer T., Tan N.* Design of PI controller using optimization method in fractional order control systems, *IFAC-PapersOnLine*, 2018, Vol. 51, No. 4, pp. 841-846.
15. *Chernyy G.G.* Gazovaya dinamika [Gas dynamics]. Moscow: Nauka, 1988, 424 p.
16. *Haddrell A.E. et al.* Accounting for changes in particle charge, dry mass and composition occurring during studies of single levitated particles, *The Journal of Physical Chemistry A*, 2012, Vol. 116, No. 40, pp. 9941-9953.
17. *Besekerskiy V.A., Popov E.P.* Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control systems]. St. Petersburg: Professiya, 2003, 752 p.
18. *Bequette B.W.* Process control: modeling, design, and simulation. Prentice Hall Professional, 2003.
19. *Bar-Kana I.* Adaptive control: A simplified approach, *Control and Dynamic Systems*, 2012, Vol. 25, pp. 187-235.
20. *Gayvoronskiy S.A., Ezangina T.A.* Metodika vybora parametrov PI-regulyatora dlya interval'noy sistemy avtomaticheskogo upravleniya [Methodology for selecting PI controller parameters for an interval automatic control system], *Vektory blagopoluchiya: ekonomika i sotsium* [Vectors of well-being: economics and society], 2012, No. 3 (4), pp. 143-147.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.Л. Вященко.

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

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

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

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

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

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

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

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

УДК 681.5, 517.935

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

И.Ю. Липко

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС СТЕНДА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КАЧКИ КАТАМАРАНА В ВЕТРОВОЛНОВЫХ УСЛОВИЯХ

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

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