

19. Karty NOAA [NOAA Charts]. Available at: <https://www.charts.noaa.gov/InteractiveCatalog/nrnc.shtml> (accessed 25 August 2023).
20. Nikiitin A.A. Teoreticheskie osnovy obrabotki geofizicheskoy informatsii: uchebnik dlya VUZov [Theoretical foundations of processing geophysical information: a textbook for universities], Moscow: Nedra, 1986, pp. 122-123.
21. Amosov O.S. Intellekturnye informatsionnye sistemy. Neyronnye seti i nechetkie sistemy [Intelligent information systems. Neural networks and fuzzy systems], Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-on-Amur gos. tekhn. un-t, 2005, 106 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. профессор А.И. Машошин.

**Мартынова Любовь Александровна** – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: martynowa999@bk.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89219411395; д.т.н.; с.н.с.; в.н.с.

**Розенгауз Михаил Борисович** – e-mail: rozengauz\_mb@mail.ru; тел.: 89219411395; к.т.н.; с.н.с.

**Martynova Liubov Alexandrovna** – JSC CSRI Elektropribor; e-mail: martynowa999@bk.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79219411395; dr. of eng. sc.; senior researcher; leading researcher.

**Rozengauz Mikhail Borisovich** – e-mail: rozengauz\_mb@mail.ru; phone: +79219411395; cand. of eng. sc.; senior researcher.

УДК 621.337.11:004.942:519.876.5

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-18-28

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

### **ОБОСНОВАНИЕ ОБЛИКА ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОДЪЕМ ПОДВОДНОГО ГРУЗА**

*Целью исследования является разработка способа взаимодействия судна с подводным грузом для его приема и транспортировки. В статье представлены результаты создания комплекса подъема подводного груза на судно-носитель. Облик комплекса формировался на основе оценки возможных технических решений, проведения теоретических расчетов и моделирования. Выполнен анализ предыдущего опыта создания аналогов. Для стыковки с подводным грузом с судна-носителя опускается на четырех точках подвеса специальный приемный модуль, причем выбор сделан в пользу схемы тросового подвеса. Разработаны четыре механизма, составляющие основу комплекса – механизм подъема, механизм компенсации, механизм демпфирования и механизм фиксации. Основу механизма подъема составляют лебедки с электроприводом, использующие электрические асинхронные двигатели с векторным управлением. Канат механизма подъема заведен через полиспаст к грузу. Для компенсации возмущений, вызванных качкой судна-носителя, в разрыв канатной линии включена гидроневматическая система, которая парирует возникающие динамические нагрузки путем перемещения штоков гидроцилиндров. Механизм демпфирования поглощает энергию соударения платформы спускаемого модуля с корпусом судна-носителя в режиме причаливания. Механизм фиксации обеспечивает надежное крепление спускаемого модуля с подводным грузом или без него в походном положении с корпусом судна носителя. Модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором получена из обобщенной схемы, путем замыкания обмоток ротора накоротко. Предусмотрен частотный способ управления, за базовый вектор принят вектор потокосцепления ротора. В модели тросового подвеса учтена его деформация при движении в процессе эксплуатации. Модель механизма компенсации создана на основании адиабатического процесса в макроскопической системе, при котором система не обменивается теплотой с окружающим пространством. В ходе расчетов и моделирования параметры узлов и механизмов подобраны таким образом, что обеспечиваются технически реализуемые условия функционирования комплекса. При этом ограничены нагрузки на тросовую систему и исключены ее провисания, ход каретки компенсатора минимизирован. В результате был получен квазиравномерный подъем подводного груза с незначительными колебаниями скорости при качке судна-носителя.*

*Комплекс подъема подводного груза; подводный груз; судно-носитель; спускаемый модуль; механизм подъема; механизм компенсации; механизм демпфирования; механизм фиксации; качка; моделирование.*

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

### JUSTIFICATION FOR IMAGE OF EQUIPMENT FOR UNDERWATER CARGOES

*The purpose of the study is to develop a method of interaction of a vessel with underwater cargo for both loading and transporting. The article presents the findings of the research on reacting a unit for lifting underwater cargo onto a vessel. The image of the unit was formed on the basis of an assessment of possible technical solutions, theoretical findings and modelling. The analysis of the previous research on creating alternatives is being carried out in the given research. To dock with underwater cargo from the vessel, a special receiving module is lowered at four suspension supports, a cable suspension scheme is of great preference. Four mechanisms have been developed to form the basis of the unit such as the lifting mechanism, the compensation mechanism, the damping mechanism and the locking mechanism. The lifting mechanism is based on electric winches on electric asynchronous motors worked on vector control. The rope of the lifting mechanism is bound through the pulley to the load. To compensate for the disturbances caused by the rolling of the carrier vessel, a hydropneumatic system is included in the rupture of the cable line, which fends off the emerging dynamic loads by moving the rods of the hydraulic cylinders. The damping mechanism absorbs the energy of the impact of the platform of the descent module with the hull of the vessel in the mooring mode. The locking mechanism ensures reliable fastening of the descent module with or without underwater cargo in a stowed position with the hull of the carrier vessel. The model of an asynchronous motor with a short-circuited rotor is obtained from a generalized circuit by shorting the rotor windings. A frequency control method is provided, the rotor flow coupling vector is taken as the base vector. The cable suspension model takes into account its deformation during movement during operation. The compensation mechanism model is based on an adiabatic process in a macroscopic system, in which the system does not release any heat to room. While calculating and modeling, the parameters of the nodes and mechanisms are selected in such a way that technically feasible conditions for the operation of the unit are provided. The loads on the cable system are limited and its sagging is excluded, the stroke of the compensator carriage is minimized. As a result, a quasi-uniform lifting of the underwater cargo was obtained with minor speed fluctuations during the rolling of the carrier vessel.*

*Underwater cargo lifting unit; underwater cargo; carrier vessel; descent module; lifting mechanism; compensation mechanism; damping mechanism; locking mechanism; pitching; modeling.*

**Введение.** В связи с развитием флотов и расширением работ по использованию ресурсов океана задачи аварийно-спасательного обеспечения существенно усложнились. Создание спасательных судов и судов устранения аварий, способных решать одинаково эффективно любые задачи, стало затруднительным и даже нерациональным, поскольку такой комплекс приобретает слишком большое водоизмещение и на его строительство и эксплуатацию требуется значительное увеличение затрат. Поэтому в последние годы характерным является строительство судов-спасателей и других устройств со специализированными функциями и определенными конструктивными особенностями. Уменьшения эксплуатационных затрат можно добиться путем разработки спасательных средств с весьма ограниченными основными задачами, например, создание судов-носителей (буксируемых платформ) и судов устранения аварий.

**Обоснование конструкции.** Анализ состояния и тенденций развития технических устройств, обеспечивающих безопасный подъем и транспортировку подводного груза с судном – носителем показывает, что несмотря на значительное количество различных грузоподъемных судовых механизмов, готового приемлемого решения для подъема подводного груза водоизмещением несколько тысяч тонн найти не удастся. Предлагаемые конструкции предназначаются либо для поднятия малогабаритных и достаточно легких грузов, либо отличаются значительной сложностью [1–7]. Широко применяемые для поднятия больших грузов цанговые захваты с трубчатыми элементами не способны обеспечить режима стабилизации в условиях качки. Поэтому наиболее гибким и надежным средством подъема признаны механизмы с тросовыми лебедками.

Важной технической проблемой является также вопрос размещения точек подвеса тросовых систем и их количество. Достаточно очевидно, что наименьшие возмущения от бортовой качки обеспечивает схема побортного симметричного расположения двух точек подвеса (рис. 1,а) или размещение одной точки подвеса в центре качания (ЦК) (рис. 1,б), а для эффективной компенсации килевой качки – продольное симметричное размещение двух точек подвеса относительно центра качания судна (рис. 1,в).

Для более равномерного распределения нагрузок на конструкцию платформы их количество выбрано равным четырем, и они расположены в диаметральной плоскости судна. Следует отметить, что при парировании колебаний груза, вызываемых килевой качкой и особенно вертикальными перемещениями корпуса судна, известны применение качающейся траверсы или отдельного гидропривода для отслеживания качки.

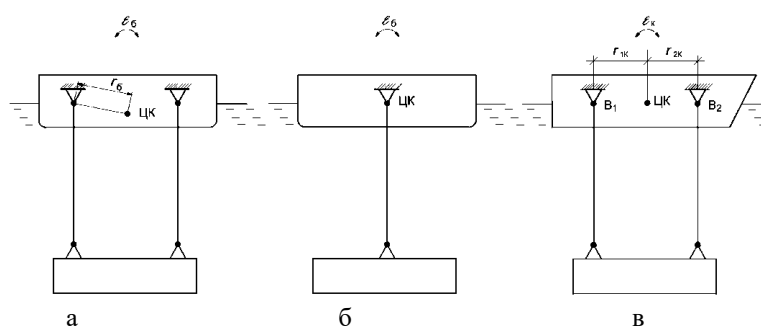


Рис. 1. Схемы подвеса платформы на тросовой системе: а – расположение точек подвеса платформы в условиях бортовой качки; б – расположение точек подвеса платформы в условиях бортовой качки в диаметральной плоскости; в – расположение точек подвеса платформы в условиях килевой качки

Для более равномерного распределения нагрузок на конструкцию платформы их количество выбрано равным четырем, и они расположены в диаметральной плоскости судна. Следует отметить, что при парировании колебаний груза, вызываемых килевой качкой и особенно вертикальными перемещениями корпуса судна, известны применение качающейся траверсы или отдельного гидропривода для отслеживания качки.

Через эти конструкции прошли корабельные артиллерийские установки и пусковые установки с качающимися башнями и карданами направляющих балок. Такая компенсация с помощью качающегося коромысла или с помощью полиспа-ста-компенсатора значительно усложняло их конструкцию. В результате наведение в условиях качки полностью взяли на себя следящие приводы вертикального и горизонтального наведения. Исходя из этого оба упомянутых способа признаны нецелесообразными.

Поэтому для работы в условиях волнения применен механизм компенсации, задачей которого является защита механизма подъема (МП) от перегрузок при положительных ускорениях (судно идет вверх) и исключения провисания тросовой системы при отрицательных ускорениях (судно идет вниз).

Таким образом в состав комплекса подъема подводного груза входит резидентная корабельная часть и спускаемый модуль. Корабельная часть включает: механизм подъема, механизм демпфирования, механизм фиксации, токопереход и электрооборудование.

Электропривод лебедки МП целесообразно выполнить на базе обычных асинхронных электродвигателей (ЭД) с короткозамкнутым ротором с применением частотных преобразователей с векторным регулированием. Векторное регулирование обеспечивает требования по точности стабилизации и удовлетворительные силовые характеристики при различных оборотах ЭД.

**Математическая модель асинхронного двигателя.** Рассмотрим обобщенную схему асинхронной машины с короткозамкнутым ротором (АКЗ) (рис. 2).

Для динамических систем необходимо учитывать переходные электромагнитные процессы в машине [8, 9]. В этом случае в качестве пары переменных, описывающих машину, оставим пространственные вектора тока статора и потока сцепления ротора ( $\vec{\psi}_R, \vec{i}_S$ ).

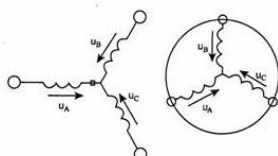


Рис. 2. Обобщённая схема асинхронного двигателя

Структурная схема АКЗ и её модель зависит от выбора базового вектора, который определяет скорость вращения координат. За базовый вектор принимается тот, который при анализе совмещается с одной из осей системы координат. Если во вращающейся с относительной угловой скоростью  $\omega_k$  системе координат с вещественной осью «х» и мнимой осью «у» за базовый вектор принять вектор  $\vec{i}_S$ , то система координат будет вращаться со скоростью  $\omega_1$  равной угловой частоте напряжения питания. Эта идея лежит в основе частотных способов управления АКЗ [10–13].

Для применения векторного управления следует за базовый вектор принять вектор потока сцепления ротора и совместить вектор с осью «х» вращающейся системы координат (принять  $\psi_{Ry} = 0$ ) [15], тогда при питании статорных обмоток от источника напряжения получим

$$u_{Sx} = r(1 + T'_S s)i_{Sx} - \omega_k L'_S i_{Sy} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Rx}, \quad (1)$$

$$u_{Sy} = r(1 + T'_S s)i_{Sy} + \omega_k L'_S i_{Sx} + k_R p \omega_m \psi_{Rx}, \quad (2)$$

$$0 = -k_R R_R i_{Sx} + \frac{1}{T_R} \psi_{Rx} + s \psi_{Rx}, \quad (3)$$

$$0 = -k_R R_R i_{Sy} + (\omega_k - p \omega_m) \psi_{Rx}, \quad (4)$$

$$M = 1,5 p k_R \psi_{Rx} i_{Sy}, \quad (5)$$

$$J s \omega_m = M - M_H. \quad (6)$$

Существенной особенностью этой математической модели является то обстоятельство, что угловая скорость вращения системы координат зависит от значений переменных состояния машины и определяется из четвертого уравнения системы

$$\omega_k = \frac{k_R R_R i_{Sy}}{\psi_{Rx}} + p \omega_m. \quad (7)$$

Структурная схема модели АКЗ при его питании от источника напряжения для случая, когда базовым вектором является вектор потока сцепления ротора приведена на рис. 3. АКЗ, как объект управления, имеет два взаимосвязанных канала. Канал по составляющей «х», определяющий потокосцепление ротора, и канал по составляющей «у», определяющий составляющую тока  $i_{Sy}$ . Если организовать управление так, чтобы на выходе канала «х» поддерживать постоянный сигнал, то потокосцепление ротора будет постоянным, а сигнал в канале «у» будет определять момент.

В этом случае структурная схема АКЗ повторяет структурную схему двигателя постоянного тока. Для такой реализации необходимо в канале «х» синтезировать регулятор потокосцепления, на входе которого поддерживать постоянный сигнал, а в канале «у» синтезировать регуляторы тока, скорости и положения.

В канале регулирования потокосцепления ротора, как правило,

$$T_R \gg T'_S, \tag{8}$$

поэтому в качестве регулятора потокосцепления целесообразно выбрать ПИ-регулятор для компенсации большей постоянной времени [16] с передаточной функцией

$$W_{p\psi}(s) = \frac{k_{p\psi}(T_R s + 1)}{T_R s}. \tag{9}$$

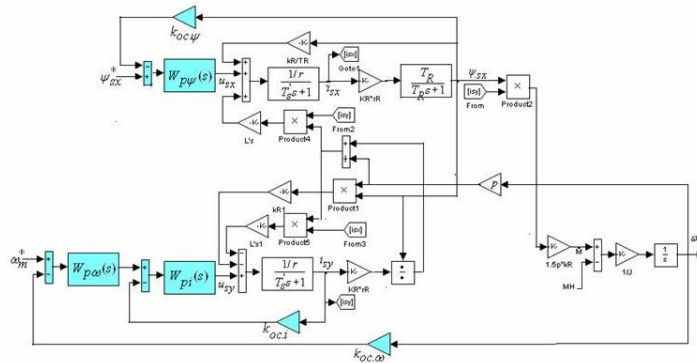


Рис. 3. Структурная схема замкнутой частотной системы с векторным управлением

Рассчитанный таким образом ПИ-регулятор компенсирует перекрестные связи в канале "х". Для компенсации влияния перекрестных связей в канале "у" следует также выбрать ПИ-регулятор с передаточной функцией

$$W_{pi}(s) = \frac{k_{pi}(T'_S s + 1)}{T'_S s}. \tag{10}$$

При компенсированных перекрестных связях канал "у", отвечающий за момент, полностью аналогичен системе постоянного тока (рис. 4).

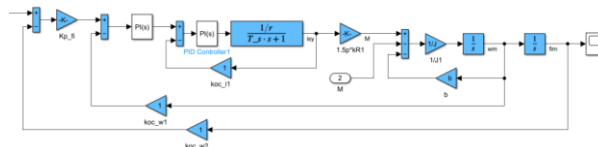


Рис. 4. Структурная эквивалентная схема замкнутой частотной системы с векторным управлением

Модель АКЗ с эквивалентной схемой векторного управления приведена на рис. 5.

**Математическая модель тросового подвеса.** Поскольку канат выполнен из стали, для расчёта силы натяжения, возникающей в тросе, применяется формула

$$T = \frac{E_{steel} \cdot S_{rope}}{L_0} dl, \tag{11}$$

где  $E_{steel}$  – модуль Юнга для стали;  $S_{rope}$  – площадь поперечного сечения каната;  $L_0$  – длина троса;  $dl$  – удлинение троса.

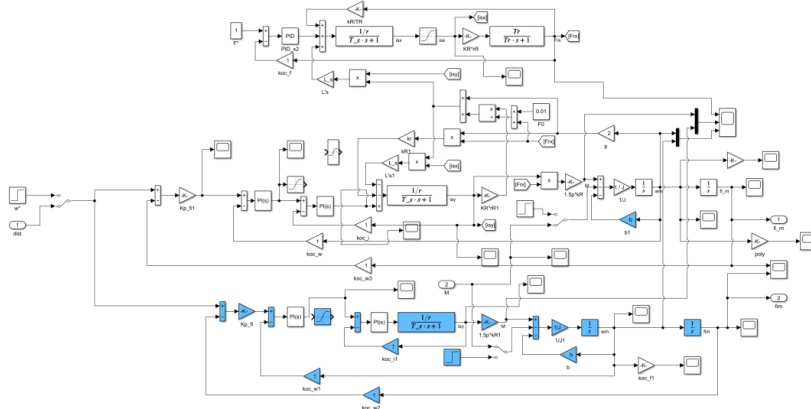


Рис. 5. Модель АКЗ с векторным управлением

Модель тросового подвеса представлена на рис. 6.

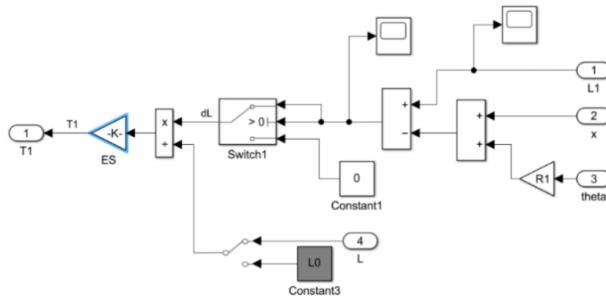


Рис. 6. Модель тросового подвеса

**Математическая модель механизма компенсации.** В активном режиме работы системы стабилизации перемещение штоков гидроцилиндров происходит достаточно быстро, поэтому пневматическая часть системы не успевает обмениваться теплотой с окружающим пространством [17]. Условию такого адиабатического процесса соответствует выражение

$$p \cdot V^\gamma = const, \quad (12)$$

где  $\gamma = 1,3$  – показатель политропы для воздуха.

В схеме механизма компенсации на один модуль подъёма применяется 2 цилиндра, диаметры наружного поршня приняты  $D_n = 0,14$  м, внутреннего –  $D_b = 0,1$  м. Начальное давление в пневмогидроаккумуляторе  $P_0 = 6,0$  МПа, начальный объём воздуха – 200 л.

С учётом того, что при разном положении цилиндра активную работу совершает разный поршень, модель механизма компенсации приведена на рис. 7. Сила, развиваемая гидроцилиндром, описывается выражением

$$F_{air} = P_{air} \cdot S_{cylinder} \quad (13)$$

и для двух наружных и внутренних цилиндров составит соответственно  $18,5 \cdot 10^4$  Н и  $9,4 \cdot 10^4$  Н. В модели учтена возможность изменения массы каретки [18, 19, 20] с учётом изменения приведённой массы каната при его сматывании и разматывании, а также ограничение по перемещению в 2 м.

**Функционирование комплекса.** Подъем груза происходит в соответствующих режимах. Вначале, в «Режиме спуска», лебедки механизма подъема равномерно стравливают тросы и происходит опускание СМ на постоянной скорости (рис. 8).

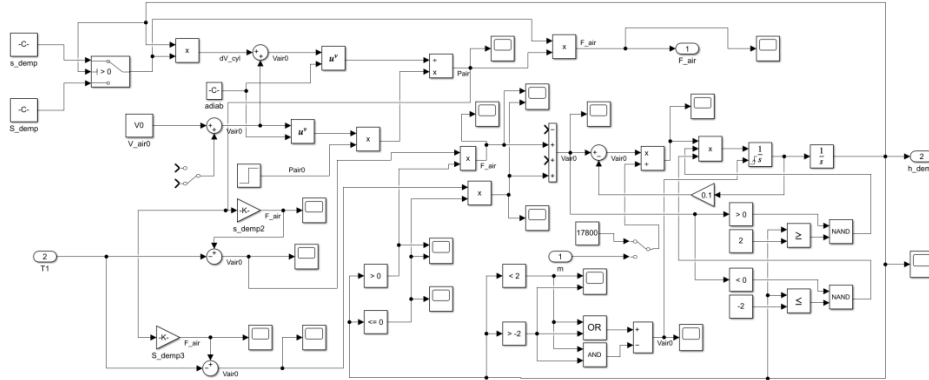


Рис. 7. Модель механизма компенсации

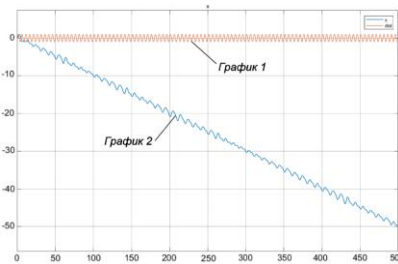


График 1 – перемещение СН; график 2 – перемещение СМ

Рис. 8. Вертикальные перемещения СН и СМ в режиме спуска

При моделировании с помощью аппарата [14] и детальном рассмотрении вы-  
илось, что СМ испытывает значительные вертикальные (рис. 9) и угловые ко-  
ания, наблюдаются провисания тросов и перемещения кареток компенсаторов  
их жестких упоров (рис. 10) с последующими рывками тросов. Поэтому был  
работан подрежим «управляемого спуска» с обеспечением стабилизации СМ.

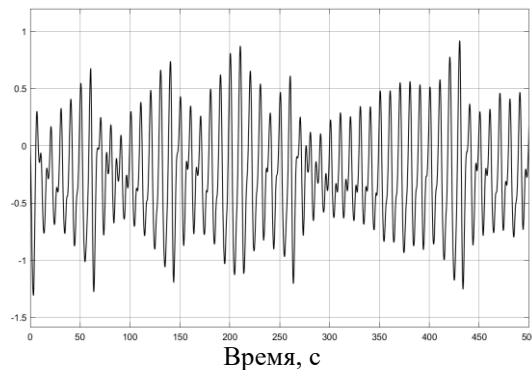


Рис. 9. Вертикальные колебания центра тяжести СМ в режиме свободного спуска

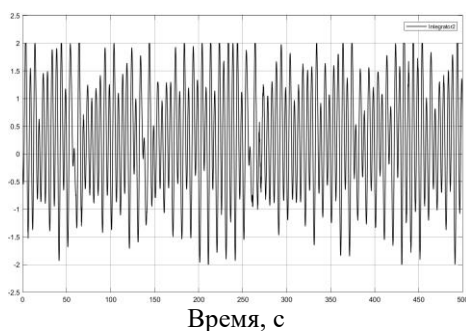


Рис. 10. Перемещение каретки компенсатора внешней лебёдки

Это позволило в условиях управляемого спуска стабилизировать возмущения обеспечить приемлемые условия спуска (рис. 11).

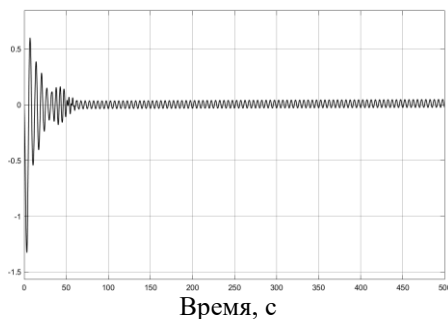


Рис. 11. Колебания относительно линейного перемещения с постоянной скоростью

В «Режиме стабилизации» СМ удерживается на постоянной глубине в горизонтальном положении (рис. 12), испытывая не скомпенсированные колебания от качки подвеса (судна-носителя).

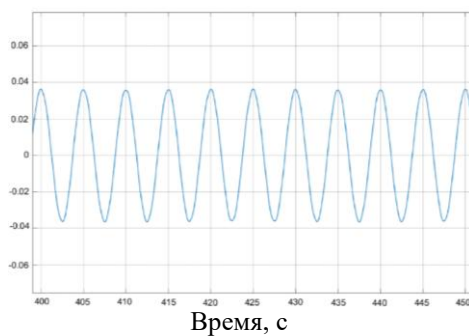


Рис. 12. Перемещения СМ в установившемся режиме

В «Режиме подъема» лебедки механизма подъема равномерно подтягивают тросы. При моделировании были учтены изменение длины троса и уменьшение массы, приведённой к каретке механизма компенсации. В результате (рис. 13) каретки механизма компенсации удовлетворительно обрабатывают возмущения, не выходя на предельные режимы (упоры).



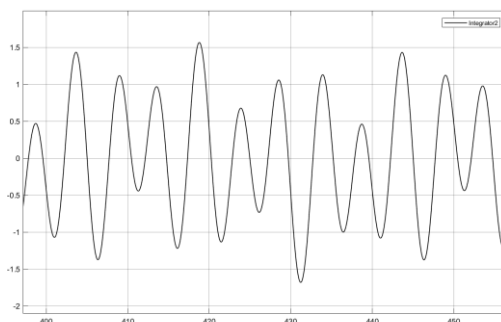


Рис. 13. Перемещения каретки механизма компенсации в режиме подъёма

**Заключение.** Предлагаемый в работе способ подъема подводного груза снабжен оригинальной конструкцией. В отличие от известных работ [1–7] комплекс подъема подводного груза по предварительным оценкам обеспечивает подводный спуск платформы на четырех тросовых подвесах и ее стабилизацию на заданной глубине. В «Режиме стабилизации» подобранные параметры механизмов позволяют достаточно эффективно удерживать спускаемый модуль на заданном горизонте. На синусоидальной волне колебания центра тяжести спускаемого модуля носят гармонический характер и не превышают 0,04 м, что вполне обеспечивает безопасный захват груза.

После сцепления с подводным грузом осуществляется их совместный подъем к судну носителю и причаливание в корабельную нишу. Носитель может транспортировать поднятый груз в базу.

Предлагаемый комплекс технических средств способен осуществлять подъем тяжелых грузов при волнении моря. Результаты расчетов и моделирования подтверждают возможность практической реализации предложенного подхода и его работоспособность.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент 2406681 С1. Российская Федерация. Плавучее подъемное средство: №2009112133/11: заявл. 01.04.2009: опубл. 20.12.2010, бюл. № 35 / А.И. Бураков.
2. Патент 2755358 С1. Российская Федерация. Грузоподъемное устройство для подъема затонувших объектов: №2020136480: заявл. 03.11.2020: опубл. 15.09.2021, бюл. № 26 / А.Ф. Трифонов, О.В. Цуканов, В.В. Абыденников и др.
3. *Nagan Srinivasan*. Tension base TLP can support development in 4000 ft depths // *Offshore*. – 1995. – March. – P. 48, 50, 65.
4. Патент 218212 С2. Российская Федерация. Подводная платформа: №2000112726/03: заявл. 22.05.2000: опубл. 10.05.2002, бюл. № 13 / М.В. Войлошников, Э.И. Черней.
5. *Bruce L. Hutchison, Duane Zaible*. Conceptual Design of Medium-Endurance Research Vessel Optimized for Mission Flexibility and Seakeeping // *Marine Technology*. – 1987. – Vol. 24, No. 2. – April. – P. 170-190.
6. Патент 2778183 С1. Российская Федерация. Вертикальный канатный судоподъемник: №2021105981: заявл. 10.03.2021: опубл. 15.08.2022, бюл. № 23 / С.Ю. Лазарев, Э.М. Баранов, Г.И. Поздняк и др.
7. Патент 2301759 С1. Российская Федерация. Устройство для подъема затонувшего груза: №2006107414/11: заявл. 10.03.2006: опубл. 27.06.2007, бюл. № 18 / Ю.Д. Тарасов.
8. *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.
9. *Омельченко Е.Я.* Динамические математические модели асинхронных двигателей. – 2012.
10. *Кыюнг Н.С. и др.* Моделирование электропривода с частотным управлением асинхронного двигателя // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 3. – С. 221-228.

11. *Мещеряков В.Н. и др.* Система управления частотным асинхронным синхронизированным электроприводом // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 116-126.
12. *Семёнов А.С.* Моделирование режимов работы асинхронного двигателя в пакете программ MATLAB // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Амосова. – 2014. – Т. 11, № 1. – С. 51-59.
13. *Ahmed A., Kaur K.* Mathematical model for an asynchronous motor implemented in MATLAB // International journal of scientific & technical development. – 2023.
14. *Moler C.* Numerical Computing with MATLAB, Electronic edition: The MathWorks, Inc, Natick, MA, 2014.
15. *Герман-Галкин С.Г., Matlab & Simulink.* Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб: Корона-Век, 2008. – 386 с.
16. *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.
17. *Черный Г.Г.* Газовая динамика. – М.: Наука, 1988. – 424 с.
18. *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.
19. *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.
20. *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. – 39. – P. 1597-1605.

#### REFERENCES

1. *Burakov A.I.* Patent 2406681 C1. Russian Federation. Plavuchee pod"emnoe sredstvo [Russian Federation. Floating lifting device]: No. 2009112133/11: applic. 01.04.2009: publ. 20.12.2010, bull. No. 35.
2. *A.F. Trifonov, O.V. TSukanov, V.V. Abydenkov i dr.* Patent 2755358 C1. Russian Federation. Gruzopod"emnoe ustroystvo dlya pod"ema zatounvshikh ob"ektov [Lifting device for lifting sunken objects]: No. 2020136480: applic. 03.11.2020: publ. 15.09.2021, bull. No. 26.
3. *Nagan Srinivasan.* Tension base TLP can support development in 4000 ft depths, *Offshore*, 1995, March, pp. 48, 50, 65.
4. *Voyloshnikov M.V., Cherney E.I.* Patent 218212 C2. Russian Federation. Podvodnaya platform [Underwater platform]: No. 2000112726/03: applic. 22.05.2000: publ. 10.05.2002, bull. No. 13.
5. *Bruce L. Hutchison, Duane Zaible.* Conceptual Design of Medium-Endurance Research Vessel Optimized for Mission Flexibility and Seakeeping, *Marine Technology*, 1987, Vol. 24, No. 2, April, pp. 170-190.
6. *Lazarev S.Yu., Baranov E.M., Pozdnyak G.I. i dr.* Patent 2778183 C1. Russian Federation. Vertikal'nyy kanatnyy sudopod"emnik [Vertical rope ship lift]: No. 2021105981: applic. 10.03.2021: publ. 15.08.2022, bull. No. 23.
7. *Tarasov Yu.D.* Patent 2301759 C1. Russian Federation. Ustroystvo dlya pod"ema zatounvshego gruzha [Device for lifting sunken cargo]: No. 2006107414/11: applic.10.03.2006: publ. 27.06.2007, bull. No. 18.
8. *Afonichev D.N., Pilyaev S.N., Stepin M.A.* Matematicheskaya model' upravlyaemogo 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.
9. *Omel'chenko E.Ya.* Dinamicheskie matematicheskie modeli asinkhronnykh dvigateley [Dynamic mathematical models of asynchronous motors], 2012.
10. *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.
11. *Meshcheryakov V.N. i dr.* Sistema upravleniya chastotnym asinkhronnym sinkhronizirovannym elektroprivodom [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.

12. *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 Amosova* [Bulletin of the North-Eastern Federal University named after. MK Amosova], 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 51-59.
13. *Ahmed A., Kaur K.* Mathematical model for an asynchronous motor implemented in MATLAB, *International journal of scientific & technical development*, 2023.
14. *Moler C.* Numerical Computing with MATLAB, Electronic edition: The MathWorks, Inc, Natick, MA, 2014.
15. *German-Galkin S.G., Matlab & Simulink.* Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK [Design of mechatronic systems on a PC]. Saint Petersburg: Korona-Vek, 2008, 386 p.
16. *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.
17. *Chernyy G.G.* Gazovaya dinamika [Gas dynamics]. Moscow: Nauka, 1988, 424 p.
18. *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.
19. *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.
20. *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, 39, pp. 1597-1605.

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

**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; St. 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.