

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ АДАПТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ УСТРОЙСТВА ОБЕЗВЕШИВАНИЯ ПОЛЕЗНОГО ГРУЗА ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ

Обоснована необходимость реализации адаптивного управления системой обезвешивания специализированного тренажерного комплекса «Выход-2», предназначенного для подготовки космонавтов к работе в условиях невесомости и пониженной гравитации. Приведены теоретические зависимости параметров корректирующего устройства от длины сходящего каната и текущего режима гравитации. Описана аппаратная реализация системы управления горизонтальными перемещениями. Обозначены ключевые особенности отдельных узлов системы. Представлены результаты экспериментальных исследований работы созданной системы управления.

Ключевые слова: стенды обезвешивания, тренажеры, имитация невесомости, система управления, корректирующее устройство, адаптация.

ВВЕДЕНИЕ

Для современной пилотируемой космонавтики характерно повышенное требование к подготовке космонавтов. Важную роль в обучении космонавтов играют тренажерные комплексы позволяющие имитировать условия невесомости и пониженной гравитации на Земле [1, 2]. Одним из таких тренажеров является специализированный тренажер «Выход-2» [3, 4], в состав которого входит силокомпенсирующая система обезвешивания [5-8].

В 2018 году осуществлена глубокая модернизация системы обезвешивания тренажера «Выход-2», связанная в первую очередь с необходимостью увеличения скоростей перемещения с 0,2 до 2,0 м/с и ускорений с 0,2 до 1,6 м/с². На **рис. 1** представлен внешний вид модернизированного тренажера «Выход-2». Данная модернизация потребовала замены пассивной системы горизонтальных перемещений на активную, с разработкой соответствующей системы управления. Как было показано в [9], параметры математической модели подобных систем не являются постоянными и изменяются в зависимости от массы обезвешиваемого объекта, имитируемой гравитации, рабочей длины каната и положения объекта в рабочем пространстве.



Рис. 1. Внешний вид модернизированного тренажера «Выход-2»

Исходя из требуемых технических характеристик тренажера масса обезвешиваемого объекта может варьироваться от 3 до 250 кг, а длина сходящего каната изменяется с 0,5 до 5,0 м, что вызывает существенное изменение параметров, поэтому система управления горизонтальными перемещениями должна иметь адаптивный характер.

РАСЧЕТ АДАПТИВНОГО КОРРЕКТИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

В [10] показано, что систему управления горизонтальными перемещениями для каждого направления можно реализовать в виде обобщенной структуры, приведенной на **рис. 2**.

На **рис. 2** обозначено: МЧС – механическая часть системы; T_O , T_M – механические постоянные времени объекта и механизма; T_c , T_d – постоянные времени, характеризующие эквивалентную жёсткость и демпфирующие свойства объекта управления; $W_{зкт}$, $W_{кв}$, $W_{дв}$ – передаточные функции замкнутого контура тока, корректирующего устройства и датчика угла соответственно; M_d , M_y , M_B – моменты двигателя, упругого взаимодействия и внешнего воздействия; Ω_O – скорость объекта обезвешивания, приведенная к валу двигателя; α – угол отклонения каната от вертикали.

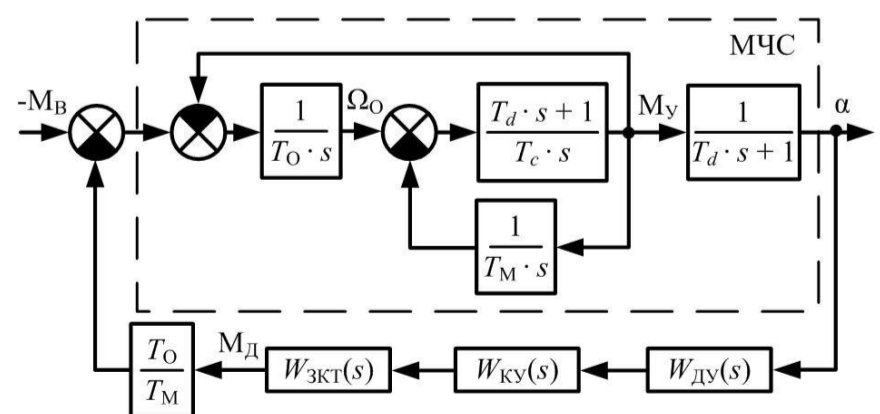


Рис. 2. Структурная схема системы управления горизонтальными перемещениями для одного из направлений

Данная структурная схема представлена в относительных единицах, где за базовые величины приняты номинальный момент двигателя M_H , скорость идеального холостого хода двигателя Ω_0 и базовый угол отклонения α_0 , равный углу отклонения объекта при зафиксированных тележке и мосте при действии внешнего усилия эквивалентному M_H :

$$\alpha_0 = M_H / \rho \mu P_0, \quad (1)$$

где ρ – радиус приведения; μ – степень обезвешивания, P_0 – вес объекта.

Согласно [5] передаточная функция корректирующего устройства должна иметь следующий вид:

$$W_{KV}(s) = k_{KV} \frac{T_D s + 1}{T_A s + 1}, \quad (2)$$

где $k_{KV} = (T_M/T_0)k_{KPY}$ – коэффициент усиления корректирующего устройства; $T_D = \sqrt{T_0 T_C / k_{KPY} k_\omega^{1/4}}$ – постоянная времени форсирующей составляющей; $T_A = T_D / k_\omega$ – постоянная времени апериодической составляющей; $k_{KPY} \approx \delta_y^{-1}$ – коэффициент усиления канала регулирования угла, определяемый требуемым статизмом по углу δ_y ; k_ω – коэффициент, выбираемый в зависимости от требуемого быстродействия и помехозащищенности, рекомендуется $k_\omega = 4 - 8$.

Данные выражения содержат переменные в относительных единицах, что неудобно при практической реализации регулятора. Кроме того, подобная запись не в полной мере раскрывает зависимость параметров регулятора от состояния системы. Поэтому целесообразно представить данные выражения в функции от абсолютных величин, воспользовавшись математическим описанием, полученным авторами в [9].

После преобразования зависимость постоянной времени форсирующей составляющей имеет вид

$$T_D = \sqrt{\frac{L \delta_y}{\mu g}} k_\omega^{1/4}, \quad (3)$$

где L – длина сходящего каната.

При практической реализации корректирующего устройства целесообразно объединить операции усиления сигнала и нормирования угла, тогда коэффициент корректирующего устройства будет равен

$$k_{KVabc} = \frac{k_{KV}}{\alpha_0} = \frac{\mu}{\delta_y} \frac{g J_M}{\rho M_H}, \quad (4)$$

где J_M – момент инерции приводного механизма.

Как видно из (3), значение постоянной времени зависит от длины сходящего каната и текущего режима гравитации. Во время тренировки режим гравитации меняется редко и лежит в диапазоне от 0,62 для марсианской гравитации до 1,0 для полной невесомости. Длина каната в свою очередь изменяется постоянно при вертикальных движениях объекта и лежит в диапазоне от 0,5 до 5,0 м. Как видно из (4), коэффициент усиления зависит только от режима гравитации и не требует непрерывной адаптации. Также можно сделать вывод об отсутствии необходимости адаптации корректирующего устройства горизонтальных перемещений от массы объекта обезвешивания.

На рис. 3 представлены частотные характеристики системы при различных ее состояниях.

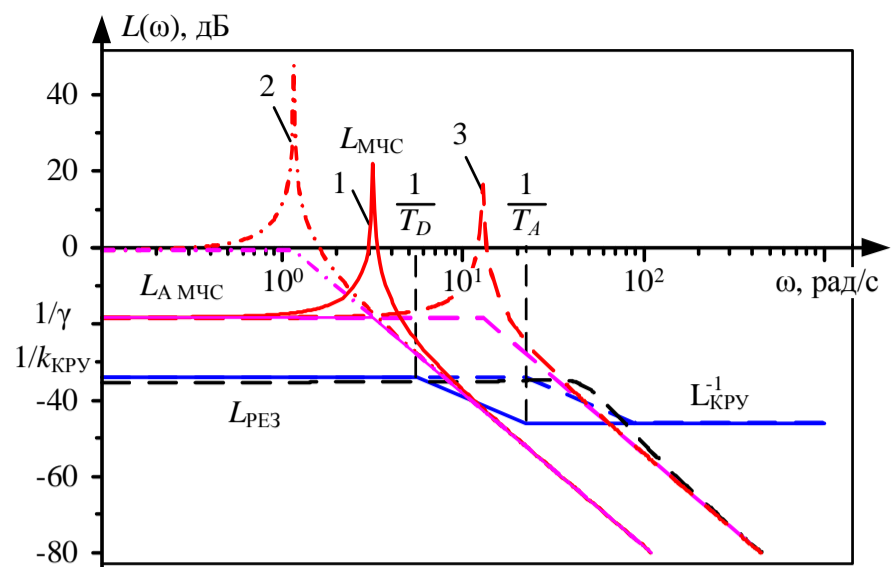


Рис. 3. Частотные характеристики синтеза корректирующего устройства: 1 – $m=250$ кг, $\mu=0,62$, $L=5$ м; 2 – $m=3$ кг, $\mu=0,62$, $L=5$ м; 3 – $m=250$ кг, $\mu=1,0$, $L=0,5$ м

Из рис. 3 видно, что при изменении массы объекта обезвешивания с 250 до 3 кг точка пересечения ЛАЧХ механической части и обратной ЛАЧХ канала регулирования угла не изменилась. Это указывает на отсутствие необходимости адаптации корректирующего устройства от массы груза, что подтверждается расчетами авторов. Также из рис. 3 видно, что при изменении длины L или коэффициента обезвешивания μ ЛАЧХ механической части смещается вдоль оси частот и для адаптации корректирующего устройства под это смещение достаточным является изменение постоянных времени T_A и T_D , что также подтверждено расчётами.

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

На рис. 4 представлена структура аппаратной реализации контура регулирования угла. Система работает следующим образом. Сигналы с датчиков отклонения обрабатываются модулями датчиков SMC30 и передается на модуль управления приводами CU320-2 PN, откуда в свою очередь поступают на программируемый логический контроллер (ПЛК) CPU 1517T-3PN/DP. В контроллере происходит объединение сигналов и реализуется алгоритм корректирующего устройства, в результате чего формируется задание на момент электродвигателя. Далее задание через модуль управления приводами поступает на двигательный модуль SINAMICS S120, который согласно этому заданию формирует требуемый момент на валу электродвигателя.

Рассмотрим подробнее некоторые узлы системы.

Устройство обезвешивания обеспечивает три поступательные степени свободы и одну вращательную относительно вертикальной оси. Вертикальное перемещение объекта осуществляется при помощи канатно-блочной системы, имеющей две параллельные ветви. Во время вращения объекта обезвешивания возникает закручивание канатов, которое приводит к возникновению противоположно направленных углов отклонений параллельных ветвей каната. Для исключения влияния данного явления на работу системы нами используются два датчика угла отклонения каната установленных в параллельных ветвях, сигналы с которых в последующем усредняются.

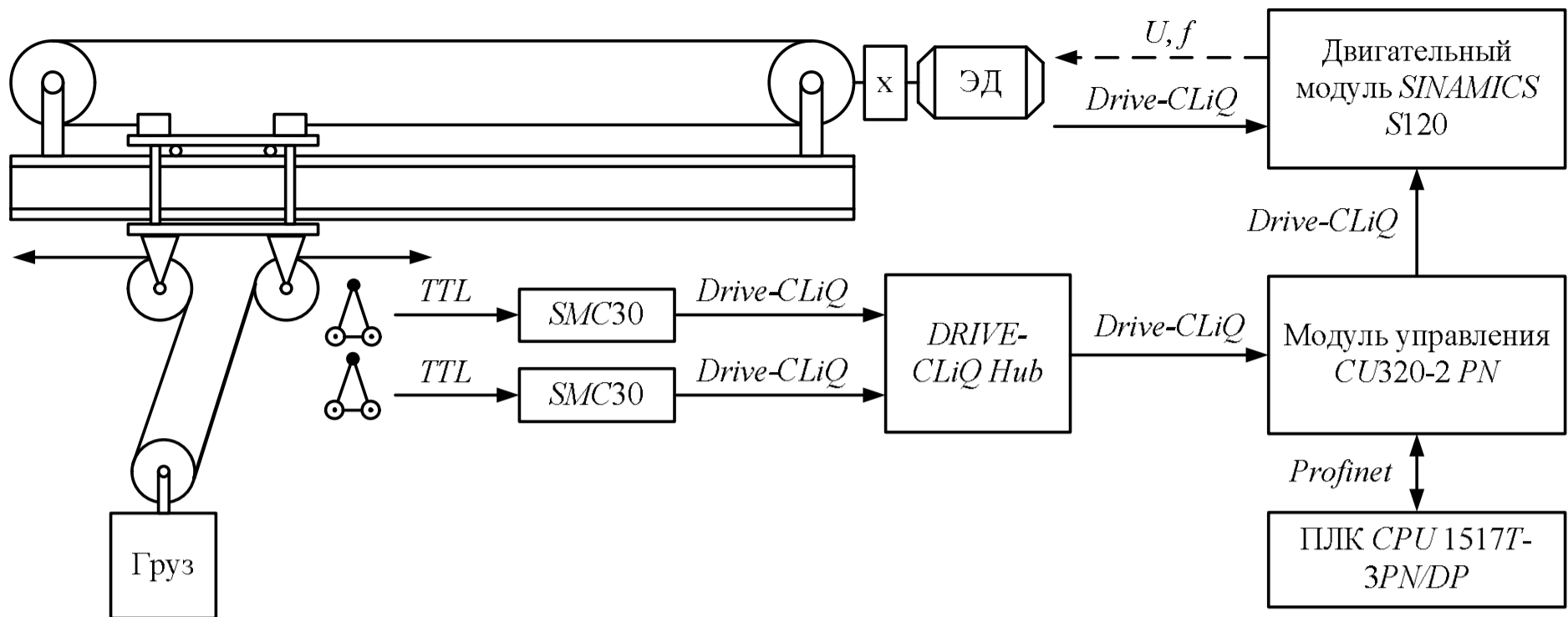


Рис. 4. Структура аппаратной реализации системы управления горизонтальными перемещениями

При измерении угла отклонения важно минимизировать инерционность и трение в механизме датчика, он должен обладать достаточным разрешением на рабочем диапазоне $\pm 2^\circ$, а его выходной сигнал должен быть нечувствительным к помехам. Поэтому в качестве чувствительного элемента датчика отклонения каната выбран фотоэлектрический инкрементальный датчик ЛИР238А с разрешением 720 000 дискрет на оборот и TTL выходным сигналом.

Необходимость адаптации параметров корректирующего устройства осложняет его реализацию в модуле управления CU320-2 PN, поэтому целесообразно все вычислительные операции, связанные с объединением сигналов с датчиков угла, расчетом параметров корректирующего устройства и его работой, осуществлять в ПЛК. При этом цикл обмена между модулем управления и ПЛК, а также цикл обработки алгоритмов должен быть достаточно коротким. В рассматриваемом случае он составил 1 мс.

Одним из важных элементов системы является приводной электродвигатель. Для обеспечения высокого качества регулирования и хороших энергетических показателей его инерционность должна быть минимальной. Кроме того, из-за особенности эксплуатации тренажерных комплексов для подготовки космонавтов используемый электродвигатель должен выдерживать длительную работу на малых скоростях ($< 0,1\Omega_0$). Поэтому в качестве привода выбран синхронный электродвигатель с постоянными магнитами SIMOTICS S-1FK7 Compact.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для подтверждения эффективности адаптивного корректирующего устройства осуществлен следующий эксперимент. При разомкнутом контуре регулирования угла груз раскачивался до заданной амплитуды, после чего в момент покоя груза, соответствующий максимальному отклонению каната, контур регулирования замыкался. Полученные осциллограммы работы системы управления с и без адаптации приведены на рис. 5.

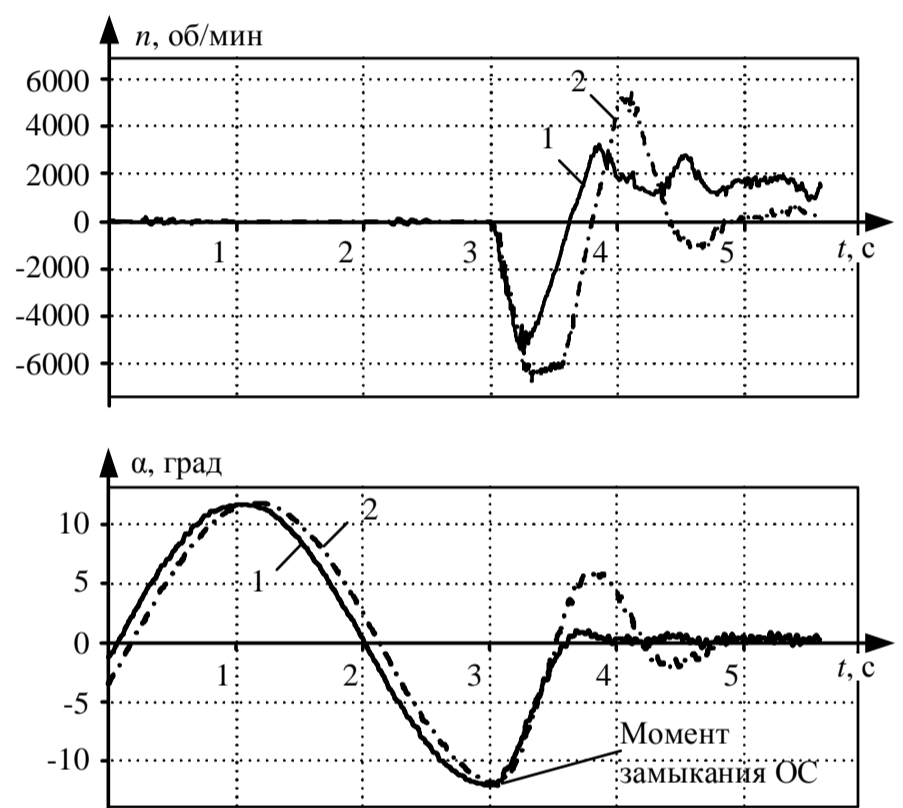


Рис. 5. Осциллограммы угла отклонения каната и частоты вращения двигателя: 1 – без адаптации; 2 – с адаптацией

Из рис. 5 видно, что в случае отсутствия адаптации график изменения угла отклонения каната затухает быстрее, однако при этом груз успевает развить значительную скорость в направлении противоположном отклонению каната. В случае адаптивного корректирующего устройства затухание колебаний осуществляется медленнее, но при этом объект (груз) остается в исходной точке в состоянии покоя. Таким образом, за счет адаптации можно достичь лучшего качества имитации условий невесомости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Изменения параметров математической модели связанные с изменением длины сходящего каната в 10 раз и степени обезвешивания в 2 раза, требуют реализации адаптивного управления горизонтальными перемещениями.

2. При адаптации параметров корректирующего устройства необходимо использовать приведенные аналитические зависимости.

3. При практической реализации системы управления горизонтальными перемещениями рекомендуется использовать:

– два датчика угла, устанавливаемых в параллельных ветвях, для исключения влияния закручивания канатов;

– инкрементальные фотоэлектрические датчики для наилучшей чувствительности измерительной системы;

– внешний регулятор на базе быстродействующего программируемого логического контроллера;

– синхронный двигатель с постоянными магнитами для надежной работы на малых частотах вращения.

4. В случае отсутствия адаптивного регулирования система горизонтальных перемещений может некорректно обрабатывать возмущающие воздействия, снижая качество имитации условий невесомости и пониженной гравитации.

Результаты получены в рамках реализации проекта 585596-EPP-1-2017-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP Fostering Internationalisation in AgRicultural Engineering in Iran and Russia.



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Crew on the iss: creativity or determinism? / Krikalev S.K., Kalery A.Yu., Sorokin I.V. // *Acta Astronautica*. 2010. Т. 66. № 1-2. С. 70-73.
2. Пятибратов Г.Я., Кравченко О.А., Папирняк В.П. Способы реализации и направления совершенствования трена-

жёров для подготовки космонавтов к работе в невесомости // *Изв. вузов. Электромеханика*. 2010. №5. С. 70-76.

3. Кравченко О.А., Пятибратов Г.Я. Создание и опыт эксплуатации силокомпенсирующих систем, обеспечивающих многофункциональную подготовку космонавтов к работе в невесомости // *Изв. вузов. Электромеханика*. 2008. №2. С. 42-47.
4. Pyatibratov G.Y., Kravchenko O.A., Kivo A.M. Design principles and implementation of advanced simulators for training astronauts to work in zero or low gravity conditions // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 1410-1414. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.337
5. Pyatibratov G.Y., Bekin A.B., Bogdanov D.Y. Retrofit simulator to train cosmonauts for working in non-gravity and reduced gravity environment // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 129. Pp. 42-50. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.006
6. Принципы построения и реализация систем компенсации силы тяжести / Кравченко О.А., Пятибратов Г.Я., Сухенко Н.А., Бекин А.Б. // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки*. 2013. № 2 (171). С. 32-35.
7. Кравченко О.А. Принципы построения многокоординатных силокомпенсирующих систем // *Изв. вузов. Электромеханика*. 2008. №3. С. 43-47.
8. Барыльник Д.В., Пятибратов Г.Я., Кравченко О.А. Силокомпенсирующие системы с электроприводами переменного тока тренажерных комплексов подготовки космонавтов Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. Новочеркасск: Ред. журн. «Изв. Вузов. Электромеханика»; «Лик», 2012. 176 с.
9. Богданов Д.Ю., Кравченко О.А. Математическая модель электромеханических стендов обезвешивания с учетом силовых взаимодействий в радиальной конструкции // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. №1(38). С. 26-32. doi: 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-26-32.
10. Pyatibratov G.Y., Bogdanov D.Y., Bekin A.B. Synthesis of an object moving control system with flexible suspension under the action of external forces // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 129. P. 29-36. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.004

Поступила в редакцию 26 декабря 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DEVELOPMENT AND REALIZATION OF ADAPTIVE CONTROLLER OF REAL WEIGHT UNLOADING MOTION DEVICE OF SIMULATOR FOR COSMONAUTS TRAINING

Dmitriy Yu. Bogdanov

Assistant, the department of Energy supply and electric drive, Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia. E-mail: bogdanov_dmitr@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7851-6045>.

Oleg A. Kravchenko

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the department of Energy supply and electric drive, Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia. E-mail: mvk346428@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2974-448X>.

The realization relevancy of the unloading system with adaptive control of specialized training complex "Vyhod-2" for training of cosmonauts to work in zero gravity and low gravity is justified. The theoretical restrictions of the correcting device parameters on convergent rope length and current gravity mode are given. The hardware implementation of the horizontal movement control system is described. The key points of the separate unit of the system are designated. The experimental research results of the designated control system are presented.

Keywords: unloading test bench, simulators, weightlessness imitation, control system, correcting device, adaptive.

REFERENCES

1. Krikalev S.K., Kalery A.Yu., Sorokin I.V. Crew on the iss: creativity or determinism? // *Acta Astronautica*. 2010. Vol. 66, no. 1-2. pp. 70-73.
2. Pyatibratov G.Y., Kravchenko O.A., Papirnyak V.P. Ways of realization and directions of perfection of simulators for preparation of cosmonauts for work in weightlessness. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. [Proceedings of Universities. Electromechanics], 2010, no.5, pp. 70-76 (In Russian).
3. Kravchenko O.A., Pyatibratov G.Y. Creation and experience in the operation of force-compensating systems providing

- multifunctional training of cosmonauts to work in weightlessness. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. [Proceedings of Universities. Electromechanics], 2008, no. 2, pp.42–47 (In Russian).
4. Pyatibratov G.Y., Kravchenko O.A., Kivo A.M. Design principles and implementation of advanced simulators for training astronauts to work in zero or low gravity conditions. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150, pp. 1410-1414. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.337.
 5. Pyatibratov G.Y., Bekin A.B., Bogdanov D.Y. Retrofit simulator to train cosmonauts for working in non-gravity and reduced gravity environment. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 129, pp. 42-50. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.006.
 6. Kravchenko O.A., Pyatibratov G.Y., Sukhenko N.A., Bekin A.B. The architecture and realization of systems compensating force of gravity. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. [University news. North-Caucasian region. Technical sciences series], 2013, no. 2 (171), pp. 32-35 (In Russian).
 7. Kravchenko O.A. Principles of construction of multi-coordinate force compensating systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. [Proceedings of Universities. Electromechanics], 2008, no. 3, pp.43–47 (In Russian).
 8. Baryl'nik D.V., Pyatibratov G.Y., Kravchenko O.A. *Sil'kompensiruyushchie Sistemy s Elktroprivodami Peremennogo Toka Trenazhernykh Kompleksov Podgotovki Kosmonavtov* [Force Balancing Systems with AC Electric Drives of Cosmonauts' Training Complexes]; South Russian State Technical University (NPI). Novocherkassk, Publishing center of « Proceedings of Universities. Electromechanics», 2012, 176 pp. (In Russian).
 9. Bogdanov D.Yu., Kravchenko O.A. Mathematical Model of Electromechanical Weightlessness Simulators Taking Account of Force Interactions in Radial Construction. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 26-32. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-26-32](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-26-32).
 10. Pyatibratov G.Y., Bogdanov D.Y., Bekin A.B. Synthesis of an object moving control system with flexible suspension under the action of external forces. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 129, pp. 29-36. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.004.

Богданов Д.Ю., Кравченко О.А. Разработка и реализация адаптивного регулятора перемещения устройства обезвешивания полезного груза тренажера для подготовки космонавтов // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 1(42). С. 19-23. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-19-23](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-19-23)

Bogdanov D.Yu., Kravchenko O.A. Development and Realization of Adaptive Controller of Real Weight Unloading Motion Device of Simulator for Cosmonauts Training. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 1(42), pp. 19-23. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-19-23](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-19-23)