

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СПАСАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА С МАХОВИЧНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

К.Д. Сологуб

twiraar@mail.ru

SPIN-код: 3964-1696

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Представлен расчет параметров динамической модели инновационного спасательного устройства, предназначенного для использования при пожарах на морских буровых платформах. Оригинальность конструкции описанного устройства заключается в использовании энергии спуска с помощью маховичного накопителя для удаления спасательной капсулы на безопасное расстояние от пожара. Показано, что подобная конструкция позволяет снизить временные затраты на техническое обслуживание спасательной техники, а отсутствие необходимости в энергопитании делает ее более пригодной для использования в аварийных ситуациях, по сравнению с существующими моделями. Представлены расчеты и моделирование параметров, которые необходимо учитывать при проектировании устройства. На основе анализа полученных моделей доказана корректность работы предложенной динамической модели, с точки зрения безопасности.

Ключевые слова

Рекуперация энергии, динамическая модель, спасательное устройство, маховичный накопитель энергии, коэффициент рекуперации энергии, передаточное отношение, допустимая скорость спуска, оптимизация конструктивных параметров

Поступила в редакцию 29.11.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Основные проблемы, возникающие при эксплуатации морских буровых платформ, связаны с обеспечением безопасности работ и сложностью разработки устройств аварийной эвакуации людей. Обзор патентов, посвященных этим вопросам, показал, что имеются существенные недостатки в описании расчетов устройств автоматизации спасательных средств [1, 2]. Один из основных заключается в том, что при возникновении пожара на буровых платформах доступ по воздуху бывает затруднен, тогда эвакуация людей усложняется. Имеющиеся устройства аварийной эвакуации в условиях отсутствия энергопитания часто не могут быть использованы вследствие ограниченности своих возможностей.

Обзор ряда источников показал, что эвакуация людей осуществляется путем управляемого спуска. Однако требования постоянной готовности спасательных устройств приводят к необходимости обеспечивать регулярный контроль и техническое обслуживание этих устройств.

Кинематическая схема спасательного устройства, изображенного на рис. 1, выгодно отличается от известных [3, 4] тем, что позволяет рекуперировать часть энергии торможения при спуске в маховичном аккумуляторе энергии

и использовать накопленную энергию после спуска для удаления контейнера на достаточное расстояние. Таким образом, спасательное устройство, оборудованное механизмами рекуперации энергии торможения, не требует энергоснабжения при подготовке к спуску и находится в состоянии постоянной готовности на платформе.

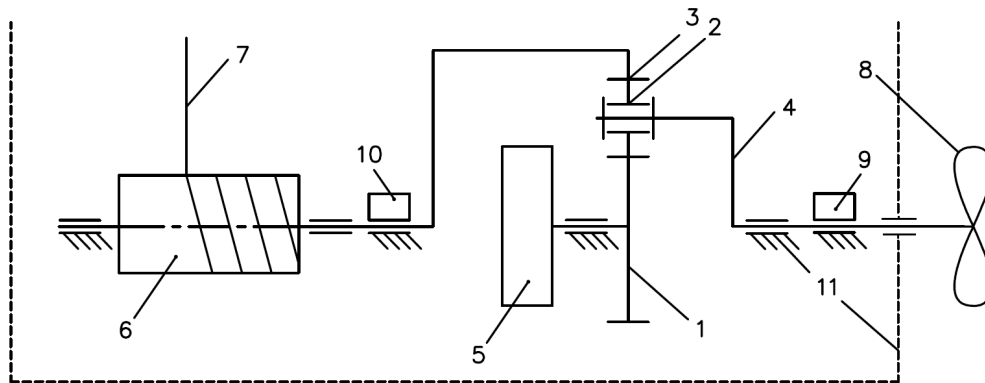


Рис. 1. Кинематическая схема спасательного устройства:

1 — солнечное колесо; 2 — спутник; 3 — коронное колесо; 4 — водило; 5 — маховик; 6 — барабан; 7 — трос; 8 — винт; 9 — тормоз винта; 10 — тормоз барабана; 11 — корпус контейнера

Трудности расчета спасательного устройства заключаются в том, что необходимо увязать между собой противоречивые критерии динамических и экономических показателей спасательного устройства, определяющие скорость спуска и запас рекуперированной энергии, аккумулируемой в спускаемом контейнере.

Предложенное устройство (см. рис. 1) состоит из спасательного контейнера 11, который можно спускать на тросе 7. Последний намотан на барабан 6, с которого при спуске трос сматывается. Барабан входным валом связан с мультипликатором, увеличивающим скорость вращения маховика по сравнению со скоростью барабана, и состоит из солнечного колеса 1, спутника 2, коронного колеса 3 и водила 4. Выходным валом мультипликатор связан с маховиком 5. Принцип работы спасательного устройства заключается в том, что при спуске контейнера с людьми часть энергии торможения запасается в маховичном накопителе, который выполняет также функции ограничителя скорости спуска. Маховичный накопитель передает накопленную энергию на винт 8. Система также предусматривает наличие двух тормозов: тормоза винта 9 и тормоза барабана 10.

Динамическая модель описывает изменения перемещений и скоростей спускаемого контейнера. Проблемы расчета спасательного устройства связаны, в первую очередь, с необходимостью выбора оптимальных конструктивных параметров, распределением масс маховичного накопителя энергии и контейнера. Динамический расчет спасательного устройства производится согласно теореме об изменении кинетической энергии [5, 6]:

$$\Sigma A = \Delta T,$$

где ΣA — работа сил тяжести спускаемого контейнера, являющихся движущей силой; ΔT — суммарное изменение кинетической энергии контейнера и маховичного накопителя энергии. Работа движущей силы определяется высотой спуска H . Потери работы на силы сопротивления могут быть учтены с помощью КПД механизмов спуска [7, 8]:

$$\Sigma A = mgH\eta,$$

здесь m — масса спасательного устройства; g — ускорение силы тяжести; η — механический КПД; H — полная высота спуска.

Изменение кинетической энергии двухмассной системы состоит из энергии спускаемого контейнера и энергии, запасаемой маховиком [9, 10]:

$$T = \frac{mV^2}{2} + J_{\max} \frac{\omega_{\max}^2}{2},$$

где V — скорость спуска контейнера; J_{\max} — момент инерции маховика; ω_{\max} — угловая скорость вращения маховика.

Отбираемая и запасаемая маховиком энергия снижает запас кинетической энергии контейнера, тем самым уменьшая скорость спуска. Скорость снижения контейнера V и скорость вращения маховика связаны передаточным отношением мультипликатора, расположенного между барабаном и маховиком:

$$u = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\text{бар}}} = \frac{\omega_{\max}}{V} r_{\text{бар}},$$

где $\omega_{\text{бар}}$ — угловая скорость барабана (скорость сматывания троса), $\omega_{\text{бар}} = \frac{V}{r_{\text{бар}}}$;

$r_{\text{бар}}$ — радиус барабана.

Поскольку располагаемая при спуске работа способствует увеличению кинетической энергии контейнера и маховика, то запишем уравнение:

$$mgH\eta = \frac{m\omega_{\text{бар}}^2 r_{\text{бар}}^2}{2} + J_{\max} \frac{\omega_{\max}^2}{2}. \quad (1)$$

Для удобства динамического расчета данного уравнения принимаем некоторые обозначения: K_E — коэффициент рекуперации энергии, равный отношению запасаемой маховиком энергии к потенциальной энергии системы и являющийся критерием экономичности в качестве доли энергии, запасаемой маховиком по отношению к общей располагаемой работе, $K_E = \frac{J_{\max} \omega_{\max}^2}{2mgH\eta}$; K_I — инерционный коэффициент, представляющий собой отношение момента инерции маховика и приведенного к барабану момента инерции контейнера, то есть коэффициент, характеризующий свойства распределения масс двухмассной си-

стемы, $K_J = \frac{J_{\max}}{mr_{\text{бар}}^2}$. В качестве оптимизируемого конструктивного параметра спасательного устройства примем передаточное отношение мультипликатора u , связывающего барабан и маховик.

С учетом принятых обозначений выражение (1) принимает вид, отражающий соотношение коэффициентов K_E , K_J и искомого передаточного отношения мультипликатора u :

$$K_E = \frac{1}{\frac{1}{K_J u^2} + 1}. \quad (2)$$

Полученное выражение (2) связывает важные параметры спасательного устройства, которые могут быть приняты в качестве критериев качества и параметров проектирования. На рисунке 2 представлены трехмерные зависимости коэффициента рекуперации энергии, передаточного отношения мультипликатора и инерционного коэффициента, полученные путем моделирования характеристик спасательного устройства в системе Mathcad [11, 12].

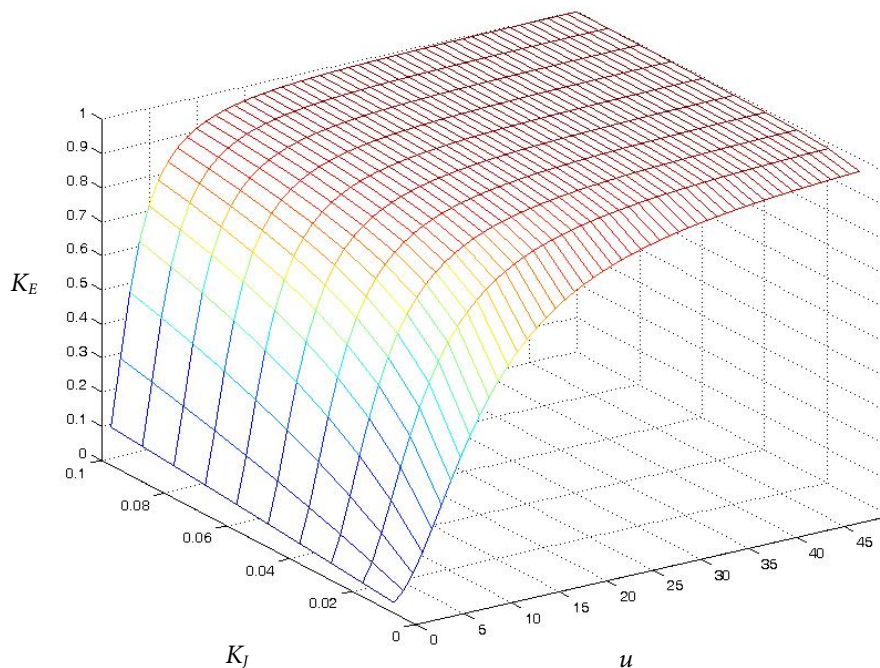


Рис. 2. Трехмерные зависимости коэффициента рекуперации энергии от передаточного отношения мультипликатора и инерционного коэффициента

Полученные уравнения (1) и (2) могут быть использованы для определения скорости в конце спуска контейнера, то есть максимальной скорости снижения без рекуперации энергии торможения:

$$V_{\max} = \sqrt{2gH\eta},$$

а также скорости снижения с желаемым коэффициентом рекуперации энергии (см. рис. 1)

$$V = \sqrt{2gH\eta(1 - K_E)}. \quad (3)$$

Связь критерия качества и экономичности двухмассной системы K_E со скоростью спуска V и высотой H показана на рис. 3.

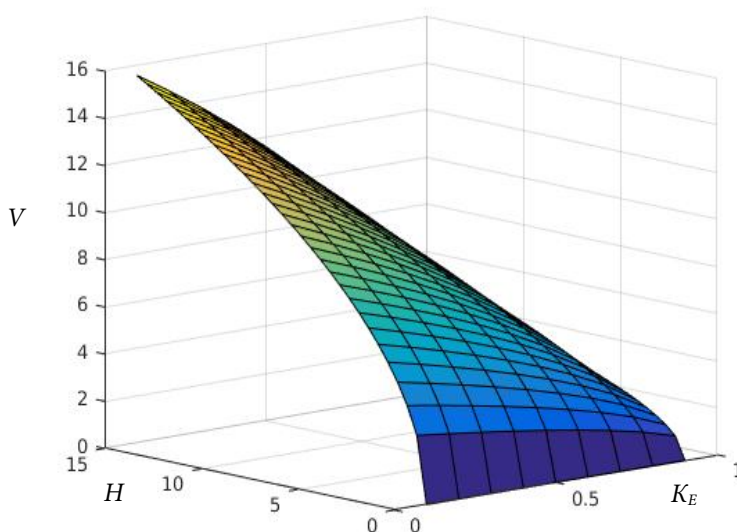


Рис. 3. Трехмерные зависимости скорости спуска от коэффициента рекуперации энергии и высоты спуска

Анализ последней зависимости показывает, что скорость в конце спуска может превышать допустимые для людей значения при отсутствии рекуперации энергии, что является существенным ограничением при проектировании. Однако увеличение коэффициента рекуперации практически решает эту проблему.

В качестве критерия безопасности спуска можно принять

$$U_V = \frac{V_{\max}}{V_{\text{доп}}},$$

где V_{\max} — максимальная скорость в конце спуска; $V_{\text{доп}}$ — максимальная допустимая скорость спуска.

Зависимость времени спуска от коэффициента рекуперации (рис. 4) запишем как

$$t_{\text{сп}} = \sqrt{\frac{2H}{g\eta(1 - K_E)}}.$$

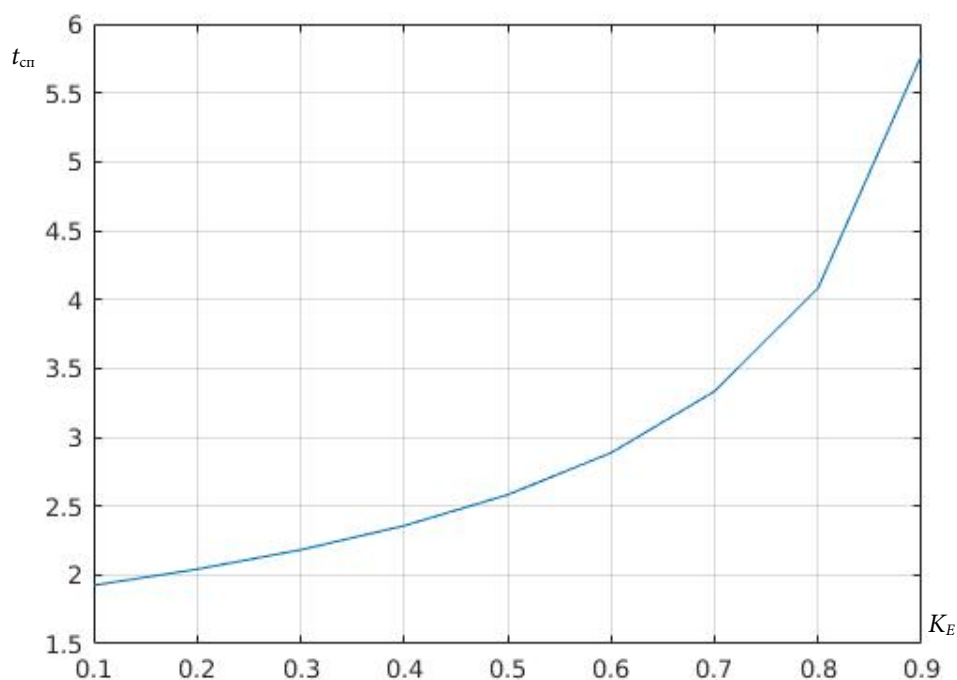


Рис. 4. Зависимость времени спуска от коэффициента рекуперации

Исследование динамической модели спасательного устройства с маховичным аккумулятором энергии позволяет сделать следующие выводы. Наиболее ценным свойством разработанной динамической модели спасательного устройства с рекуперацией энергии торможения маховичным аккумулятором энергии является возможность выбора оптимальных значений его параметров, например коэффициента рекуперации энергии и связи его с динамическими показателями.

Предварительное моделирование разработанной математической модели спасательного устройства с рекуперацией энергии позволило связать между собой тенденцию изменения оптимальных параметров для проведения последующего более глубокого исследования с применением вариатора скоростей вместо мультипликатора.

Приведенные начальные расчеты подтверждают техническую возможность повышения безопасности аварийно-спасательных работ на морских буровых платформах благодаря наличию управляющих и энергозапасяющих устройств внутри спасательного контейнера, так как спасательное устройство не требует обслуживания и энергообеспечения при эксплуатации и всегда находится в состоянии готовности к аварийному запуску.

Основным фактором, определяющим динамические качества спасательного устройства в виде максимальной скорости и времени спуска является коэффициент рекуперации $K_E = f(u)$, зависящий от передаточного отношения мультипликатора.

Литература

- [1] Зубов В.Г. *Механика*. Москва, Наука, 1978, 350 с.
- [2] Юдовский И.М. Рекуперативный маховичный привод для непрограммируемых автоматических манипуляторов. *Вестник машиностроения*, 1999, № 4, с. 9–11.
- [3] Гринвайг А.Е., Юдовский И.Д. *Рекуператор механической энергии*. А.с. СССР № 1446398. Опубл. 1980, бюл. № 47.
- [4] Гулиа Н.В., Очан М.Ю., Юдовский И.Д., Воронин Б.И., Демин А.П. *Устройство спуска людей из зданий*. А.с. СССР № 827082. Опубл. 1981, бюл. № 17.
- [5] Барбашов Н.Н. *Способ эвакуации из буровой платформы и устройство его реализации*. Патент РФ № 2615250. Заявл. 08.04.2016, опубл. 04.04.2017.
- [6] Леонов И.В. *Способ управления механизмом рекуперации энергии торможения и устройство для его осуществления*. Патент № 2011102043 РФ. Заявл. 21.01.2012, опубл. 20.06.2011, бюл. №17.
- [7] Таланов Б.П. *Устройство эвакуации людей из многоэтажных зданий*. Патент № 2050864 РФ. Заявл. 09.04.1991, опубл. 27.12.1995.
- [8] Гулиа Н.В. *Инерция*. Москва, Наука, 1982, 152 с.
- [9] Леонов И.В., Леонов Д.И. *Теория механизмов и машин*. Москва, Высшее образование, 2009, 239 с.
- [10] Леонов И.В. Барбашов Н.Н. Энергетическая модель передаточного механизма с маховичным аккумулятором энергии. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2010, № 4, с. 61–68.
- [11] Барбашов Н.Н., Леонов И.В. Динамическая модель подъемно транспортной машины с аккумулятором энергии. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, № 9, с. 45–50.
- [12] Егорова О.В., Леонов Д.И., Леонов И.В., Павлов Б.И. *Применение системы Mathcad в курсовом проектировании по теории механизмов и машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 49 с.
- [13] Vidal P. *Aide memoire d'automatique*. Paris, Dunod, 196 p.

Сологуб Кристина Дмитриевна — инженер 2 категории кафедры «Теория механизмов и машин», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Леонов Игорь Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Теория механизмов и машин», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**MODELLING THE CHARACTERISTICS OF THE LIFE-SAVING APPARATUS
EQUIPPED WITH A FLYWHEEL ENERGY STORAGE UNIT**

K.D. Sologub

twiraar@mail.ru

SPIN-code: 3964-1696

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**Abstract**

The article demonstrates the calculation of the innovative life-saving apparatus dynamic model parameters. This apparatus can be used in a fire emergency at the offshore drilling platforms. The novelty of the described device design lies in using the discharge energy by means of the flywheel energy storage unit in order to withdraw the survival capsule to the safe distance from the fire. The research shows that this design allows reducing the time expenditures for the rescue equipment maintenance, and the absence of necessity in power supply makes it more useful compared to the existing models for exploitation in emergency situations. We present a calculation and modelling the parameters that must be considered when designing the device. Based on the analysis of the models obtained we prove the correct operation of the suggested dynamic model from the viewpoint of safety.

Keywords

Energy recovery, dynamic model, life-saving apparatus, flywheel energy storage unit, energy recovery coefficient, gear ratio, permissible discharge speed, optimization of structural parameters

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Zubov V.G. Mekhanika [Mechanics]. Moscow, Nauka publ., 1978, 350 p.
- [2] Yudovskiy I.M. Recuperative flywheel-type drive for nonprogrammable automative manipulators. *Vestnik mashinostroeniya*, 1999, no. 4, pp. 9–11.
- [3] Grinvayg A.E., Yudovskiy I.D. Rekuperator mekhanicheskoy energii [Mechanical energy recuperator]. Invention certificate SSSR no. 1446398. Publ. 1980, bull. no 47.
- [4] Gulia N.V., Ochan M.Yu., Yudovskiy I.D., Voronin B.I., Demin A.P. Ustroystvo spuska lyudey iz zdaniy [Equipment for people convey off the buildings]. Invention certificate SSSR no. 827082. Publ. 1981, bull. no. 17.
- [5] Barbashov N.N. Sposob evakuatsii iz burovoy platformy i ustroystvo ego realizatsii [Method for evacuation from drilling platform and equipment for its realization]. Patent no. 2615250 RF. Appl. 08.04.2016, publ. 04.04.2017.
- [6] Leonov I.V. Sposob upravleniya mekhanizmom rekuperatsii energii tormozheniya i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [Control method for recuperation mechanism of drilling platform and equipment for its realization]. Patent no. 2011102043 RF. Appl. 21.01.2012, publ. 20.06.2011, bull. no.17.
- [7] Talanov B.P. Ustroystvo evakuatsii lyudey iz mnogoetazhnykh zdaniy [Equipment for people evacuation from multistory buildings]. Patent no. 2050864 RF. Appl. 09.04.1991, publ. 27.12.1995.
- [8] Gulia N.V. Inertsia [Inertion]. Moscow, Nauka publ., 1982, 152 p.

- [9] Leonov I.V., Leonov D.I. Teoriya mekhanizmov i mashin [Machines and mechanisms theory]. Moscow, Vysshee obrazovanie publ., 2009, 239 p.
- [10] Leonov I.V. Barbashov N.N. Energy model of transmission mechanism with flywheel energy storage. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2010, no. 4, pp. 61–68.
- [11] Barbashov N.N., Leonov I.V. Dynamic model lifting-and-shifting machines battery powered. *Izvestiya VUZov. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2012, no. 9, pp. 45–50.
- [12] Egorova O.V., Leonov D.I., Leonov I.V., Pavlov B.I. Primenenie sistemy Mathcad v kursovom proektirovanii po teorii mekhanizmov i mashin [Application of Mathcad system for course engineering on machines and mechanisms theory]. Moscow, Bauman Press, 2012, 49 p.
- [13] Vidal P. Aide memoire d'automatique. Paris, Dunod, 196 p.

Sologub K.D. — 2nd category engineer, Department of Theory of Mechanisms and Machines, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Leonov I.V., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Theory of Mechanisms and Machines, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.