

УДК 621.86

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ И ПРОЧНОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ КРАНО-МАНИПУЛЯТОРНЫХ УСТАНОВОК НА ПОДВИЖНОМ ШАССИ

А.В. Лагереv, И.А. Лагереv, А.А. Мильто

Брянский государственный университет им. акад. И.Г.Петровского

Представлена модификация предложенной ранее методики для анализа динамики и прочности гидравлических крано-манипуляторных установок на неподвижном шасси. Модификация заключается в добавлении перед шасси крано-манипуляторной установки шарнира с шестью степенями свободы, обеспечивающего его подвижность. В разработанном программном комплексе КВСane с помощью данной методики выполнен динамико-прочностной расчет крано-манипуляторной установки на плавучем средстве. На основе результатов расчета сделаны выводы о нагруженности элементов металлоконструкции КМУ.

**Ключевые слова:** динамика, кран-манипулятор, крано-манипуляторная установка, подвижное шасси, напряжение

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых ученых – кандидатов наук № МК-92.2014.8.

В работах [1-3] была представлена методика динамического и прочностного анализа гидравлических кранов-манипуляторов, в которой крано-манипуляторная установка моделировалась системой шарнирно-сочлененных тел (рис. 1).

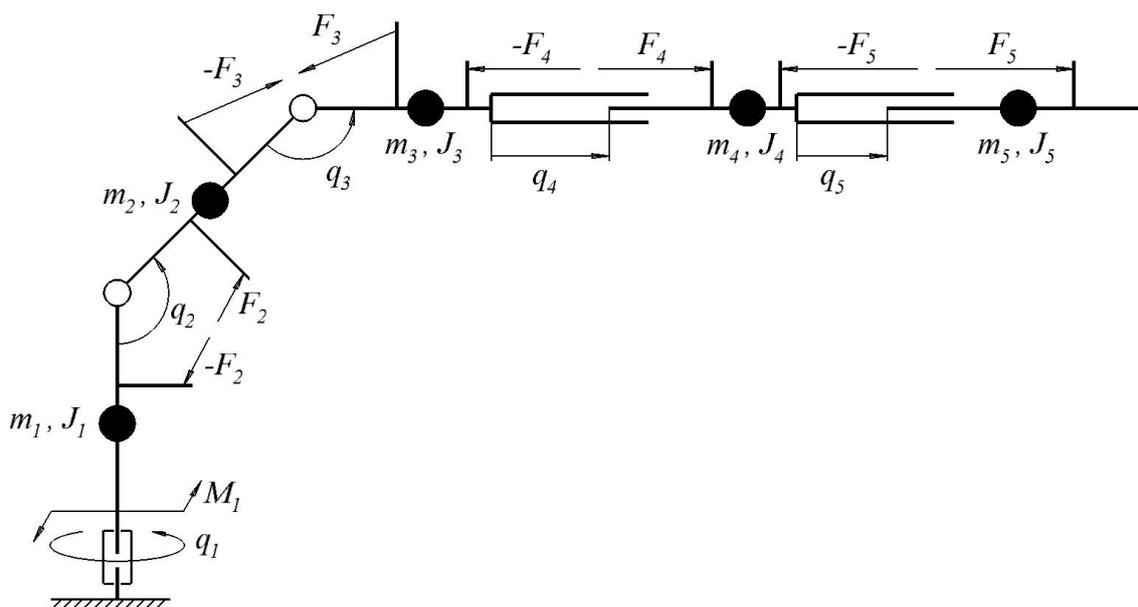


Рис. 1. Пример расчетной схемы крано-манипуляторной установки для решения задачи динамики:  $q_i$  –  $i$ -я обобщенная координата;  $m_i, J_i$  – масса и тензор инерции в центре тяжести  $i$ -го звена;  $F_i, M_i$  – усилия, передаваемые от  $i$ -го гидродвигателя

В предложенной методике были приняты допущения о недеформируемости звеньев крано-манипуляторной установки, зафиксированности основания и невесомости элементов гидропривода, позволившие использовать для решения задач динамики наименее ресурсоемкие алгоритмы [4]: алгоритм Ньютона-Эйлера (RNEA – Recursive Newton-Euler Algorithm) [5] и алгоритм составного твердого тела (CRBA – Composite Rigid Body Algorithm) [6]. Для вычисления напряжений в элементах металлоконструкции КМУ использовался алгоритм, базирующийся на положениях теории тонкостенных стержней [1].

В настоящей работе рассматривается модификация данной методики, позволяющая применять ее для анализа динамики и прочности крано-манипуляторной установки на под-

вижном шасси. Идея модификации состоит во внедрении перед основанием крано-манипуляторной установки шарнира с шестью степенями свободы (рис. 2, а).

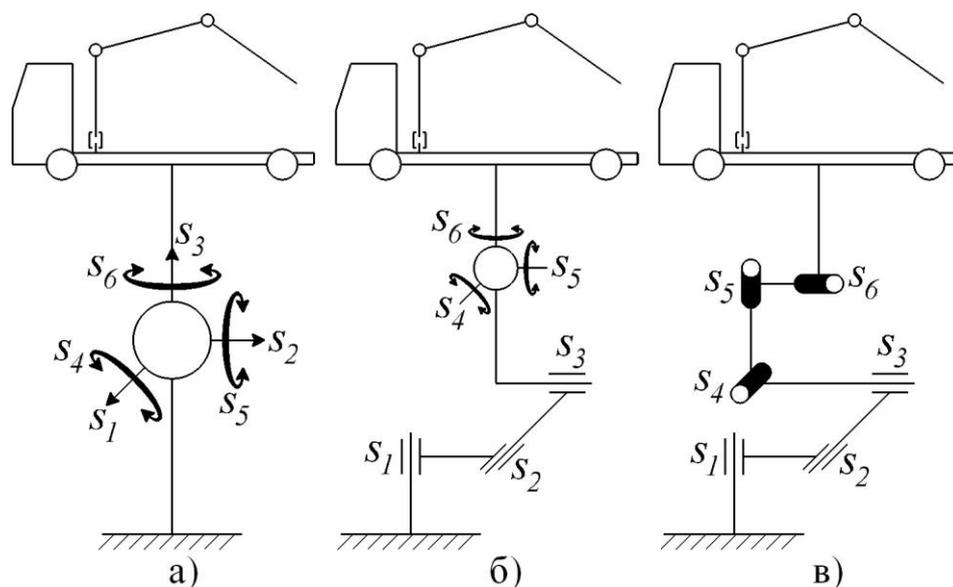


Рис. 2. Сочленение с шестью степенями свободы, моделируемое:  
 а – единым шарниром; б – комбинацией сферического и призматических шарниров;  
 в – набором петлевых и призматических шарниров

Аналогичный подход ранее был предложен в работе [7]. Он позволяет обойти обязательное условие неподвижности основания крано-манипуляторной установки, заложенное в алгоритмах RNEA и CRBA. Внедряемый шарнир может быть представлен как одним единым сочленением, обладающим шестью степенями свободы, так и набором сочленений. Использование сферического шарнира для моделирования трех вращательных степеней свободы (рис. 2, б) более предпочтительно, чем использование комбинации трех петлевых шарниров (рис. 2, в), так как данная конструкция не подвержена явлению шарнирного замка.

Наиболее актуально применение улучшенной методики при исследовании следующих ситуаций:

- разгон и торможение транспортного средства, на котором установлена крано-манипуляторная установка;
- движение транспортного средства с бортовой крано-манипуляторной установкой по криволинейной траектории;
- движение транспортного средства с бортовой крано-манипуляторной установкой по неровностям;
- эксплуатация крано-манипуляторной установки на плавучем средстве;
- оценка сейсмических воздействий на динамику и прочность крана-манипулятора.

В качестве примера в разработанном программном комплексе KBCrane Dynamics [8] смоделирована эксплуатация крано-манипуляторной установки машины АСТ-4-А [9, 10], совершающей колебания в направлениях, соответствующих степеням свободы  $s_3$  и  $s_5$  с периодом 8 с и амплитудами 0,5 м и  $15^\circ$  соответственно. В качестве исходных данных для моделирования использовались зависимости обобщенных ускорений  $\ddot{s}_3$  и  $\ddot{s}_5$  от времени (рис. 4). Расчет выполнен для двух вариантов ориентации стрелы относительно продольной оси судна  $s_2$ : вдоль ( $q_1 = 0^\circ$ ) и поперек ( $q_1 = 90^\circ$ ). Для данных расчетных случаев в программном комплексе KBCrane Graphics [11] построены графики зависимости колебаний груза ( $q_4, q_5$ ) и максимальных напряжений в стреле и рукояти ( $\sigma_2, \sigma_3$ ) от времени (рис. 5).

В обоих моделируемых сценариях колебания судна приводили к раскачиванию груза в вертикальной плоскости: в первом случае ( $q_1 = 0^\circ$ ) в направлении  $q_4$  ( $q_5 = q_6 = \text{const}$ ), во втором случае ( $q_1 = 90^\circ$ ) в перпендикулярном ему направлении  $q_5$  ( $q_4 = q_6 = \text{const}$ ). Максимальные напряжения в стреле наблюдались в первом расчетном случае в области сочленения с поворотной колонной, когда крен судна и отклонение груза от вертикали были максимальными, и достигали 295 МПа, что на 52% больше уровня максимальных напряжений зарегистрированных в стреле при отсутствии качки судна (194 МПа).

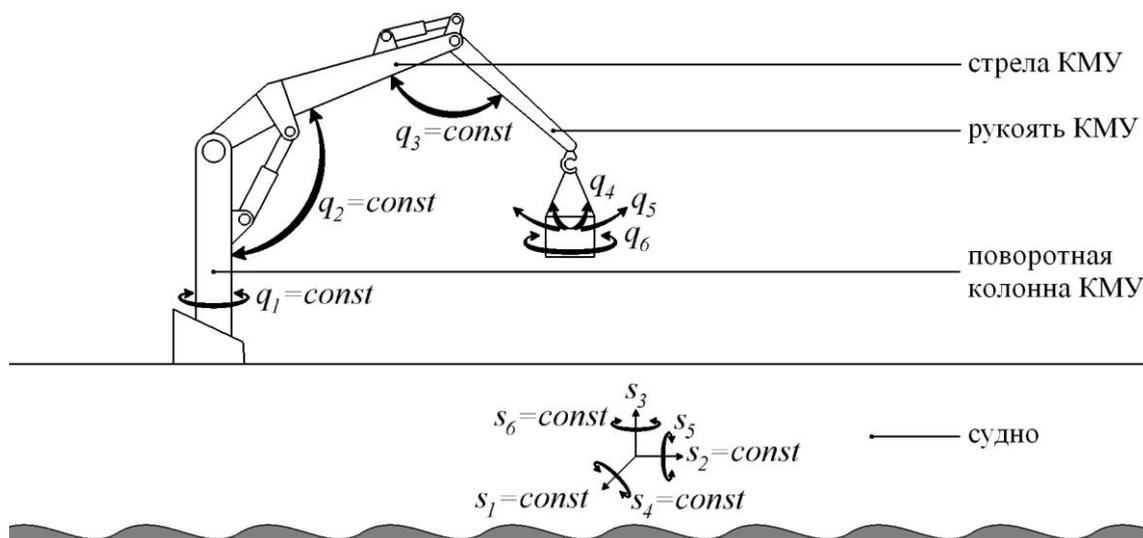


Рис. 3. Крано-манипуляторная установка на судне, раскачивающемся в направлениях  $s_3, s_5$

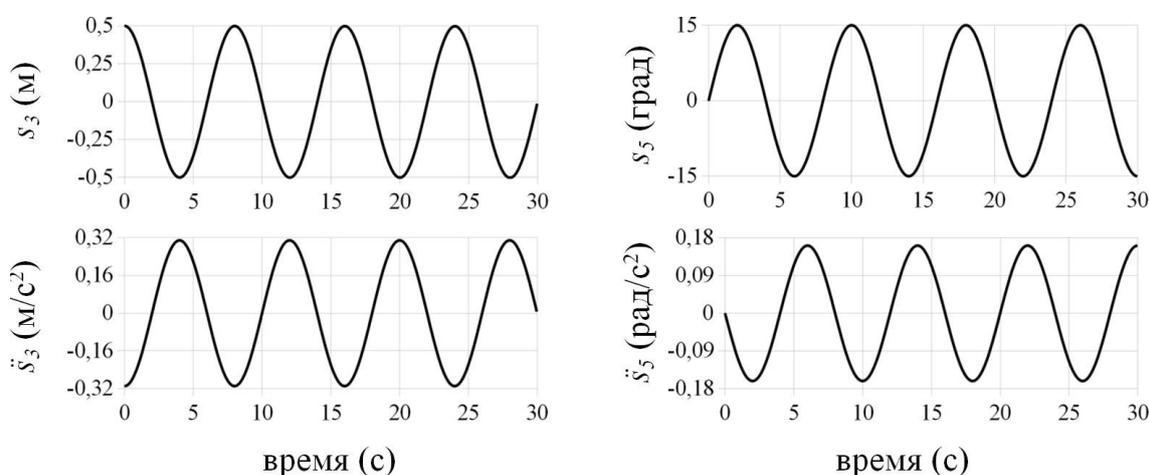


Рис. 4. Зависимости обобщенных координат  $s_3, s_5$  и ускорений  $\ddot{s}_3, \ddot{s}_5$  судна от времени

Наибольшие напряжения в рукояти зафиксированы во втором расчетном случае в области сочленения со стрелой, когда равнодействующая сил тяжести и инерции груза действовала на максимальном плече, и составили 106 МПа, что на 25% больше уровня наибольших напряжений зарегистрированных в рукояти при отсутствии раскачивания судна (85 МПа). Несмотря на то, что полученные значения максимальных напряжений не превышают предела текучести материала (390 МПа), для наиболее опасных случаев нагружения крано-манипуляторной установки целесообразно выполнить уточняющих расчет с использованием метода конечных элементов [12, 13].

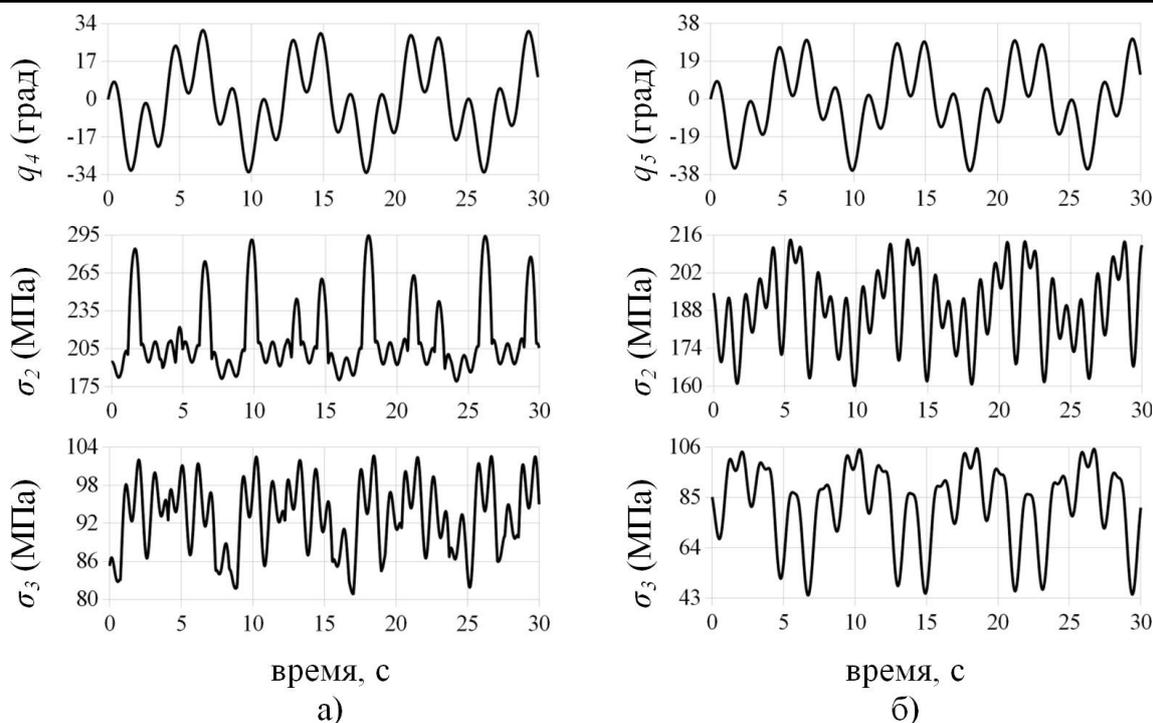


Рис. 5. Зависимости параметров моделируемой системы от времени:  
 а – при ориентации стрелы крано-манипуляторной установки вдоль оси судна;  
 б – поперек оси судна

### Список литературы

1. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Milto A.A. Tool for Preliminary Dynamics and Stress Analysis of Articulating Cranes // International Review on Modelling and Simulations. – 2014. – Vol. 7, N. 4. – P. 644–652.
2. Лагерев, А.В. Универсальная методика динамического анализа гидравлических кранов-манипуляторов / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев, А.А. Мильто // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. - №3. - С. 24-31.
3. Лагерев, А.В. Универсальная методика определения напряжений в стержневых элементах конструкций гидравлических кранов-манипуляторов в задачах динамики / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев, А.А. Мильто // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. - № 4. - С. 21-26.
4. Featherstone R. Rigid Body Dynamics Algorithms. – N.Y.: Springer, 2008. – 272 p.
5. Luh J.Y.S., Walker M.W., Paul R.P.C. On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 1980. – Vol. 102, N 2. – P. 69–76.
6. Walker M.W., Orin D.E. Efficient Dynamic Computer Simulation of Robotic Mechanisms // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 1982. – Vol. 104, N 3. – P. 205–211.
7. McMillan S., Orin D.E. Forward Dynamics of Multilegged Vehicles Using the Composite Rigid Body Method // IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 1998. – Vol. 1. – P. 464–470.
8. Лагерев, А.В. KBСrane Dynamics / А.В. Лагерев, А.А. Мильто // Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014614195. - Зарегистрир. в Реестре программ для ЭВМ 17.04.14.
9. Лагерев, А.В. Модернизация крана-манипулятора самоходной энергетической машины АСТ-4-А / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев, В.В. Говоров // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2010. - № 4. - С. 59-66.

10. Лагереv, А.В. Динамический анализ трехзвенного гидравлического крана-манипулятора / А.В. Лагереv, И.А. Лагереv // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2011. - № 3. - С. 9-16.

11. Лагереv, А.В. KBCrane Graphics / А.В. Лагереv, А.А. Мильто // Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014614196. - Зарегистрир. в Реестре программ для ЭВМ 17.04.14.

12. Лагереv, И.А. Расчеты грузоподъемных машин методом конечных элементов // И.А. Лагереv. – Брянск: БГТУ, 2013. – 116 с.

13. Вершинский, А.В. Численный анализ металлических конструкций подъемно-транспортных машин / А.В. Вершинский, И.А. Лагереv, А.Н. Шубин, А.В. Лагереv. – Брянск: РИО БГУ, 2014. – 186 с.

### **Сведения об авторах**

Лагереv А.В. - доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе НИИ фундаментальных и прикладных исследований ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», bsu-avl@yandex.ru.

Лагереv И.А. - кандидат технических наук, проректор по инновационной работе ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», lagerev-bgu@yandex.ru.

Мильто А.А. - инженер, miltoandrey@ya.ru.

## **THE STUDY OF DYNAMICS AND STRENGTH OF HYDRAULIC CRANE-MANIPULATING INSTALLATIONS ON A MOVABLE CHASSIS**

A.V.Lagerev, I.A.Lagerev, A.A.Milto

Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University

The modified version of previously reviewed technique for dynamics and stress analysis of fixed-base manipulators (articulating cranes) is suggested. The idea is to insert a fictitious six-degrees-of-freedom joint between a fixed support and manipulator's base thus eliminating fixed base motion constraints. The technique has been implemented in the software package KBCrane and used for dynamics and stress analysis of an articulating crane mounted on a ship rocking in waves. Based on the results of simulation the distribution and level of stress in the crane is estimated.

**Key words:** *articulating crane, dynamics, floating-base manipulator, stress.*

### **References**

1. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Milto A.A. Tool for Preliminary Dynamics and Stress Analysis of Articulating Cranes. *International Review on Modelling and Simulations*, 2014, Vol.7, No.4, pp. 644–652.

2. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Milto A.A. Universal technique for analysing hydraulic articulating crane dynamics, *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, No.3, pp. 24-31.

3. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Milto A.A. Universal technique for stress analysis of beam elements of articulating cranes in case of dynamic load, *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, No.4, pp. 21-26.

4. Featherstone R. *Rigid Body Dynamics Algorithms*. N.Y., Springer, 2008. 272 p.

5. Luh J.Y.S., Walker M.W., Paul R.P.C. On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1980, Vol.102, No.2, pp. 69–76.

6. Walker M.W., Orin D.E. Efficient Dynamic Computer Simulation of Robotic Mechanisms, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1982, Vol.104, No.3, pp. 205–211.

7. McMillan S., Orin D.E. Forward Dynamics of Multilegged Vehicles Using the Composite Rigid Body Method, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1998, Vol.1, pp. 464–470.
8. Lagerev A.V., Milto A.A. *KBCrane Dynamics. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM* [KBCrane Dynamics. The Certificate on official registration of the computer program]. No. 2014614195, 2014.
9. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Govorov V.V. Crane-manipulator of mobile energy unit AST-4-a modernization, *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, No.4, pp. 59-66.
10. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Dynamic analysis of a hydraulic three-tier crane-manipulator, *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, No.3, pp. 9-16.
11. Lagerev A.V., Milto A.A. *KBCrane Graphics. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM* [KBCrane Graphics. The Certificate on official registration of the computer program]. No. 2014614196, 2014.
12. Lagerev I.A. *Raschety gruzopod'yemnykh mashin metodom konechnykh elementov* [Load-lifting machines calculations by finite element method]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Tekhnicheskii Universitet, 2013. 116 p.
13. Vershinckii A.V., Lagerev I.A., Shubin A.N., Lagerev A.V. *Chislennyy analiz metallicheskikh konstruktsey pod'yemno-transportnykh mashin* [Numerical analysis of metal constructions of lifting-transport machines]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Universitet, 2014. 186 p.

#### **Authors' information**

Alexander V. Lagerev - Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice director of Research Institute of Fundamental and Applied Research at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, [bsu-avl@yandex.ru](mailto:bsu-avl@yandex.ru).

Igor A. Lagerev - Candidate of Technical Sciences, Vice rector for Innovations at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, [lagerev-bgu@yandex.ru](mailto:lagerev-bgu@yandex.ru).

Andrei A. Milto – graduate engineer, [miltoandrey@ya.ru](mailto:miltoandrey@ya.ru).