

Математическое и физическое моделирование самоустанавливающихся замков для сборки и раскрытия составных твердотельных космических зеркал

В.И. Буякас,
вед.н.с., д.ф.-м.н., bujakas@yandex.ru,
ФИАН им. П.Н.Лебедева РАН, г. Москва

Для решения задач экспериментальной физики Кельвином и Максвеллом были предложены приспособления, обеспечивающие высокую точность и повторяемость установки оптических элементов на оптической скамье. Эти удивительные простые устройства получили в англоязычной литературе название **kinematic couplings** и используются на протяжении многих лет в различных научных и прикладных исследованиях.

В настоящей работе рассматривается возможность создания на основе идеи, положенной в основу таких устройств, механических самоустанавливающихся замков для сборки и автоматического раскрытия твердотельных составных зеркал космических телескопов. Приводятся результаты кинематического анализа и физического моделирования предлагаемых устройств.

The kinematic couplings were introduced into experimental physics by Kelvin and Maxwell and ensure high accuracy and high repeatability of optical elements installation during the studies. Later the idea behind these devices become classical and had been used for many years in various scientific and applied researches, in nanotechnology studies for example. We consider the possibility to use the kinematic coupling for space applications, to be exact for locks development for precise assemblage or automatic deployment of solid space mirrors.

Введение

Во многих физических и технологических задачах необходимо добиться того, чтобы без дополнительного регулирования сложная механическая система после разборки и повторной сборки возвращалась в исходное состояние с высокой степенью точности в силу своих конструктивных свойств. Подобные задачи, в частности, постоянно возникают при разработке составных зеркал для космических телескопов. Однако аналогичные задачи возникают и в оптике при сборке и регулировании различных систем на оптической скамье, где они рассматривались еще Максвеллом и Кельвином. В этих классических работах [1] были предложены приспособления, обеспечивающие высокую точность и высокую повторяемость установки оптических элементов – линз, зеркал, призм, фотопластинок – на оптической скамье. Позднее этот метод объединения элементов конструкции получил в англоязычной литературе название **kinematic couplings** (см. например, в Википедии https://en.wikipedia.org/wiki/Kinematic_coupling). Приспособления модернизировались, дорабатывались и использовались для решения различных научных и прикладных задач. Последние десятилетия эти устройства нашли применение в нано технологиях. Здесь при высококачественном изготовлении элементов приспособления удастся обеспечить микронный и субмикронный уровень точности и повторяемости сборки элементов конструкции [2-6].

Цель работы – показать, что эти идеи лабораторной оптики могут быть использованы для решения задач конструирования составных зеркал больших космических телескопов. Мы будем называть такие соединения **кинематическими связками** и исследуем возможность создания на их основе механических самоустанавливающихся замков для космических приложений. Замки могут найти применение, например, для решения задач сборки или автоматического раскрытия больших составных зеркальных антенн [7-10]. (см. также электронные ресурсы www.jwst.nasa.gov, <http://safir.jpl.nasa.gov>, <http://www.asc.rssi.ru/millimetron>).

Основу кинематической связки в версии Максвелла составляют три V – образных паза (рис. 1а), размещаемых на одном из соединяемых элементов (основании) и три шаровых опоры, связанные с треногой - вторым соединяемым элементом (рис. 1в). В рабочем состоянии шаровые опоры находятся на дне пазов и удерживаются в этом положении силой тяжести (рис. 1с, д).

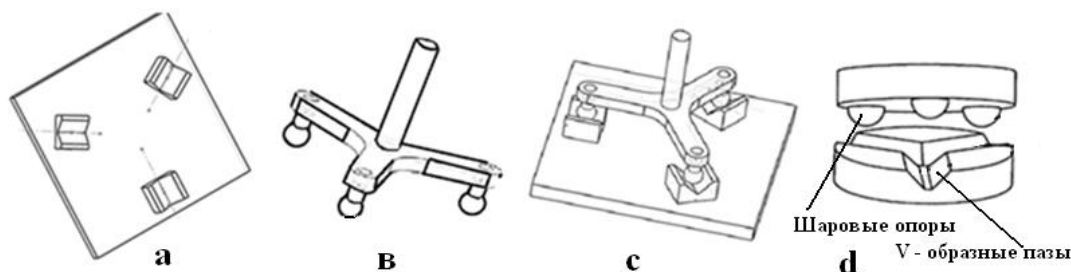


рис. 1. Кинематическая связка: а - V – образные пазы на несущем основании, в - три шаровых опоры, связанные с треногой, с – кинематическая связка в сборе, д – современная кинематическая связка оптического качества

Три особенности приспособления обеспечивают ему важные механические свойства.

Во-первых, *рабочее положение устройства является равновесным состоянием конструкции*. При малых смещениях треноги возникает усилие, возвращающее устройство в равновесное рабочее состояние.

Во-вторых, *состояние равновесия единственно*, что обеспечивает высокую повторяемость установки треноги на основание.

Наконец, в-третьих, в равновесном состоянии конструкция оказывается статически определимой, что гарантирует ненапряженную сборку приспособления. Действительно, каждая шаровая опора, удерживаемая на дне V-образного паза вносит в конструкцию два кинематических ограничения. В невырожденном случае общее число кинематических ограничений в конструкции равно шести, что гарантирует ее статическую определимость. Невырожденность системы достигается выбором направлений V-образных пазов.

С точки зрения механических свойств связей естественно различать следующие случаи. Связка может находиться в равновесном состоянии и в состоянии, смещенном относительно состояния равновесия (неравновесная связка). Если равновесное состояние единственно, то конструкция геометрически неизменяемая. Изменяемые связи могут быть мгновенно изменяемыми, т.е. допускающими бесконечно малые смещения относительно состояния равновесия, но могут допускать изменения не малые, а конечной величины. В последнем случае связка превращается в механизм.

Нас будут интересовать геометрически неизменяемые связи, поскольку в этом случае конструкция обладает самоустанавливающимся свойством, т.е. самопроизвольно возвращается в положение равновесия, которое и является желательным при ее применении. Именно это свойство использовали Кельвин и Максвелл при конструировании и последующей юстировке оптических систем.

1. 2D - кинематические связи для работы в условиях невесомости

Исследование кинематических связей начнем с того случая, когда все V-образные пазы лежат в одной плоскости, и будем называть такие связи двумерными (2D - связками).

Физическая модель 2D связи. Для того чтобы использовать идею классической кинематической связи для сборки составных космических конструкций необходимо преодолеть две трудности.

Во-первых, необходимо предложить способ удержания шаровых опор на дне V-образных пазов в условиях невесомости. В классической связке опоры удерживаются на дне пазов силой тяжести. В новых условиях нужно сохранить кинематику связей и направление удерживающих усилий в равновесном состоянии. С этой целью была предложена конструкция и изготовлена физическая модель пружинного захвата, представленного на рис. 2 а. Здесь с одной стороны сохранены четыре степени свободы во взаимном перемещении соединяемых элементов, с другой – удерживающее усилие направлено по нормали к основанию паза. На рис. 2в представлена физическая модель 2D кинематической связи с пружинными захватами для работы в условиях невесомости в сборе. Мы использовали физическую модель пружинного захвата, предложенную и изготовленную А.Ю. Тондриком (ФИАН).

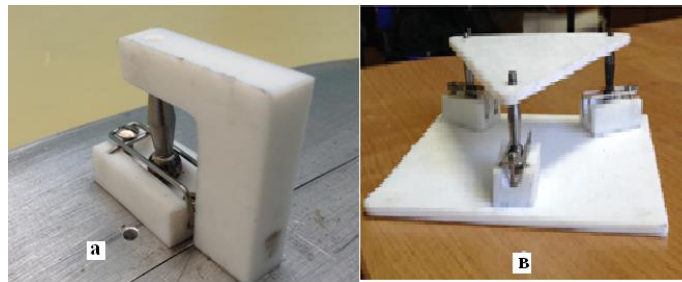


рис.2. Физическая модель 2D кинематической связи. а - пружинный захват сферической опоры, в - кинематическая связка с пружинными захватами в сборе

Во-вторых, необходимо выяснить при каких взаимных положениях пазов конструкция сохраняет самоустанавливающиеся свойства. В классической кинематической связке, использующей схему Максвелла, V-образные пазы расположены на плоскости симметрично относительно центра связки. Наша цель – соединить между собой твердотельные зеркала с помощью кинематических связей, сохранив свойство повторяемости сборки. При произвольной форме соединяемых зеркал сохранить классическое положение V-образных пазов кинематической связке не удастся, пазы и шаровые опоры приходится размещать по боковым сторонам соединяемых элементов на значительном расстоянии друг от друга. Возникает вопрос, при каком взаимном положении пазов сохраняются самоустанавливающиеся свойства конструкции. Для ответа на этот вопрос построим математическую модель, описывающую работу 2D связи при произвольном расположении V-образных пазов.

Математическая модель равновесного состояния 2D связи. Рассмотрим на плоскости Ox_1x_2 три отрезка $\omega^1, \omega^2, \omega^3$, взаимное положение которых совпадает с взаимным положением оснований V-образных пазов 2D связи (Рис.3.а). Назовем эти отрезки направляющими. Треугольник, $a^1a^2a^3$ моделирует положение треноги связки, его вершины в равновесном состоянии удерживаются механическими связями на направляющих.

Пусть α_i - угол между направляющей ω^i и осью Ox_1 , n^i – вектор нормали к ω^i , f^i - вектор реакции связей (направлен по нормали к ω^i), f_i – численное значение реакции связей. Тогда

$$f^i = (-f_i \cdot \sin \alpha_i, f_i \cdot \cos \alpha_i) = f_i \cdot n^i, \\ n^i = (-\sin \alpha_i, \cos \alpha_i), \quad (i=1,2,3).$$

Условия равновесия – сумма проекций сил на оси Ox_1, Ox_2 и сумма моментов сил относительно начала координат – имеют вид:

$$\begin{aligned} -f_1 \cdot \sin \alpha_1 - f_2 \cdot \sin \alpha_2 - f_3 \cdot \sin \alpha_3 &= F_1, \\ f_1 \cdot \cos \alpha_1 + f_2 \cdot \cos \alpha_2 + f_3 \cdot \cos \alpha_3 &= F_2, \\ [a^1 \cdot f^1] + [a^2 \cdot f^2] + [a^3 \cdot f^3] &= f_1 \cdot [a^1 \cdot n^1] + f_2 \cdot [a^2 \cdot n^2] + f_3 \cdot [a^3 \cdot n^3] = M. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь векторные произведения $[a^1 \cdot f^1]$, $[a^2 \cdot f^2]$, $[a^3 \cdot f^3]$ определяют моменты сил реакций связей f^1, f^2, f^3 относительно начала координат, F_1 и F_2 - проекции суммы внешних сил на оси Ox_1, Ox_2 соответственно, M - сумма моментов внешних сил относительно начала координат.

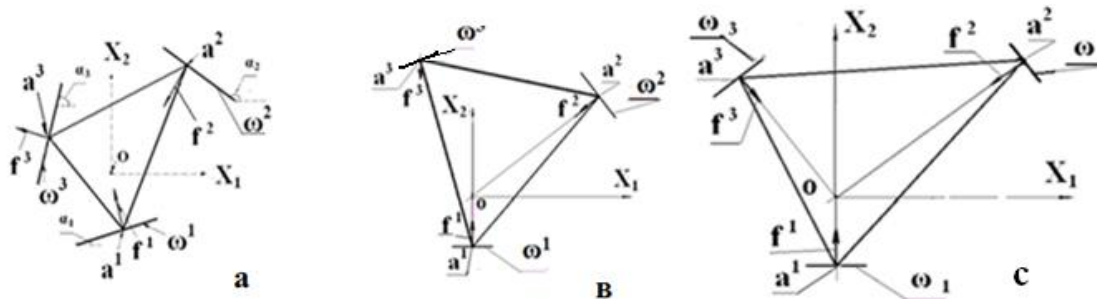


рис. 3. Равновесные (а, в) положения 2D кинематической связи, с – вырожденное состояние связи

Перепишем систему (1) в матричном виде

$$A \cdot f = F, \tag{2}$$

где

$$A = \begin{pmatrix} -\sin \alpha_1 & -\sin \alpha_2 & -\sin \alpha_3 \\ \cos \alpha_1 & \cos \alpha_2 & \cos \alpha_3 \\ [a^1 \cdot n^1] & [a^2 \cdot n^2] & [a^3 \cdot n^3] \end{pmatrix}, \quad f = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ M \end{pmatrix}.$$

Здесь A – матрица равновесия. Система (2) не вырождена - геометрически неизменяема, т.е. имеет единственное решение, если определитель матрицы равновесия A отличен от нуля. В невырожденном случае связь обладает самоустанавливающимися свойствами.

Для выяснения условий вырождения конструкции введем систему координат, в которой ось Ox_1 параллельна ω^1 , а начало координат совпадает с точкой пересечения нормалей к ω^1 и ω^2 в точках a^1 , и a^2 (рис. 3.а). В новой системе координат матрица A принимает вид:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -\sin \alpha_2 & -\sin \alpha_3 \\ 1 & \cos \alpha_2 & \cos \alpha_3 \\ 0 & 0 & [a^3 \cdot n^3] \end{pmatrix}.$$

Отсюда находим:

$$\det A = \sin \alpha_2 \cdot [a^3 \cdot n^3].$$

Поэтому, если

$$[a^3 \cdot n^3] \neq 0 \quad \text{и} \quad \sin \alpha_2 \neq 0,$$

то конструкция геометрически неизменяема, состояние равновесия единственное, и кинематическая связь действительно обладает самоустанавливающимися свойствами. Рассмотрим теперь вырожденное состояние связи. Пусть

$$[a^3 \cdot n^3] = 0$$

Тогда нормали n^1, n^2, n^3 пересекаются в одной точке, конструкция мгновенно изменяема и допускает бесконечно малое вращение (Рис. 3.с) вокруг точки пересечения нормалей.

В классических работах Максвелла V-образные пазы находятся в одной плоскости симметрично относительно центра связи. Во многих случаях необходимо отказаться от такого симметричного размещения элементов конструкции, не теряя самоустанавливающегося свойства связи. На рис. 4 представлена физическая модель двух твердотельных поверхностей, объединенных кинематической связкой с разнесенными V – образными пазами. Конструкция оснащена пружинными захватами шаровых опор. Непосредственно вычисляя определитель матрицы равновесия, убеждаемся, что при выбранном положении V – образных пазов он отличен от нуля. Это же обнаруживается и в физическом эксперименте – конструкция является жесткой, геометрически неизменяема и обладает высокой повторяемостью сборки.

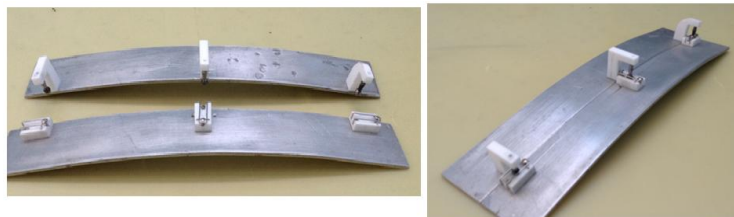


рис. 4. Две пластины, объединенные кинематической связкой с пружинными захватами

2. 3D - кинематические связи

Откажемся теперь от условия двумерности связи. Это необходимо потому, что при соединении поверхностей сложной формы нереально требовать расположения всех пазов в одной плоскости. Классическая кинематическая

связка, использующая V – образные пазы, предполагает размещение пазов на плоском основании. Для соединения криволинейных зеркал необходимо разместить пазы в пространстве и гарантировать самоустанавливающиеся свойства конструкции. Для решения пространственной задачи была построена математическая модель, описывающая равновесное состояние 3D связки, получены условия вырождения конструкции и условия сохранения самоустанавливающихся свойств связки при произвольном пространственном расположении V-образных пазов.

Полученные результаты были использовано при физическом моделировании сборки составных зеркал, представленной на рис.5. Процесс физического моделирования заключался в следующем. Два лепестковых зеркала, рабочая поверхность которых имеет параболическую форму, устанавливаются на параболическом шаблоне (стапеле) в расчетном положении (рис.5а). На обратной стороне лепестков устанавливаются и крепятся самоустанавливающиеся замки. После установки замков собранная конструкция снимается со стапеля и разбирается. Затем осуществляется повторное соединение лепестков (рис.5в). Повторная сборка лепестков, оснащенных самоустанавливающимися замками, происходит без стапеля. Собранная конструкция должна быть геометрически неизменяемой и повторять форму шаблона с высокой степенью точности. Физическое моделирование подтвердило геометрическую неизменяемость и простоту сборки составного зеркала.

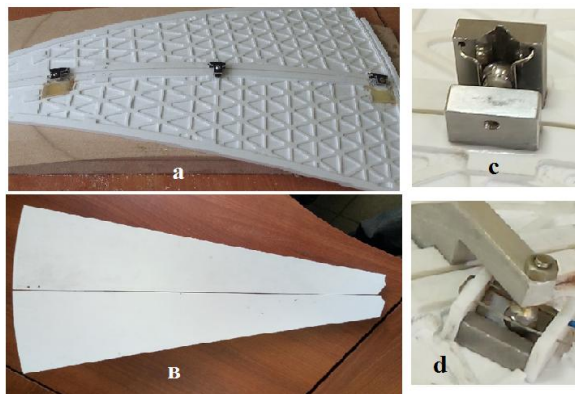


рис. 5. 3D кинематическая связка двух параболических лепестков, а - сборка двух лепестков на шаблоне, вид сзади, в - два лепестка, объединенные кинематической связкой, вид спереди, с - вертикальный захват шаровой опоры, d - горизонтальный захват шаровой опоры

3. Кинематическая связка в задаче раскрытия составного зеркала

Замечательно, что методы кинематических связок для точной сборки составных зеркал можно, слегка модифицировав, использовать и для другой родственной задачи – задачи о раскрытии составных зеркал. Эта задача особенно важна при конструировании составных зеркал для орбитальных телескопов.

Мы исследовали классическую конструкцию трансформируемого лепесткового зеркала, выполненного по схеме корпорации Дорнье [10]. Конструкция включает в себя центральное зеркало и набор лепестков, каждый из которых связан с центральным зеркалом цилиндрическим шарниром. Раскрытие зеркала осуществляется синхронным вращением лепестков вокруг осей шарниров (рис. 6). Было показано, и в этом заключается ключевая находка разработчиков корпорации Дорнье, что существует такое направление осей цилиндрических шарниров, при котором переход лепестков из сложенного состояния в раскрытое осуществляется без зацепления лепестков.

Эта конструкция была использована при создании антенны космического радиотелескопа проекта Радиоастрон [11] и эффективно работает в сантиметровой области спектра. Однако для работы зеркала в миллиметровой и субмиллиметровой области спектра достигаемой точности отражающей поверхности оказывается недостаточно.

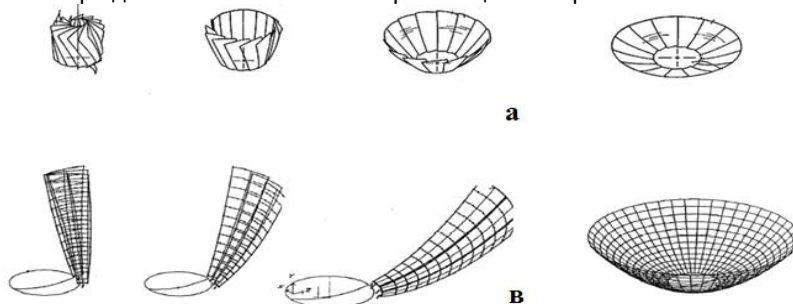


рис. 6 Классическая схема раскрытия лепесткового зеркала.

В верхней части рисунка показаны последовательные фазы раскрытия зеркала. В нижней части рисунка показаны соответствующие изменения в положении отдельного лепестка, а на последнем изображении нижнего ряда – раскрывшаяся конструкция в целом

Мы изучали возможность повышения с помощью кинематических связок точности и повторяемости раскрытия отдельного лепестка [12-14]. С этой целью была построена физическая модель системы раскрытия лепестка и проведены ее исследования. В модели на обратной стороне лепестка у его основания размещались три шаровых опоры (рис. 7). На станине, имитирующей основание центрального зеркала, устанавливались три V – образных пазы. Перевод лепестка из сложенного (транспортного) положения в раскрытое (рабочее) состояние осуществлялся вращением лепестка вокруг оси, соединяющей лепесток с основанием центрального зеркала. На заключительном этапе раскрытия шаровые опоры фиксировались на дне V – образных пазов.

В лабораторных экспериментах была достигнута 10 микронная точность повторяемости раскрытия модели (имитатора) лепестка (по нормали к отражающей поверхности), смещение в тангенциальной плоскости не превышало 30

микрон. Этапы физического моделирования представлены на рис. 8. При проведении физического моделирования мы заменяли (не изменяя сути конструкции) лепесток более простым элементом, который ниже упоминается как имитатор лепестка.

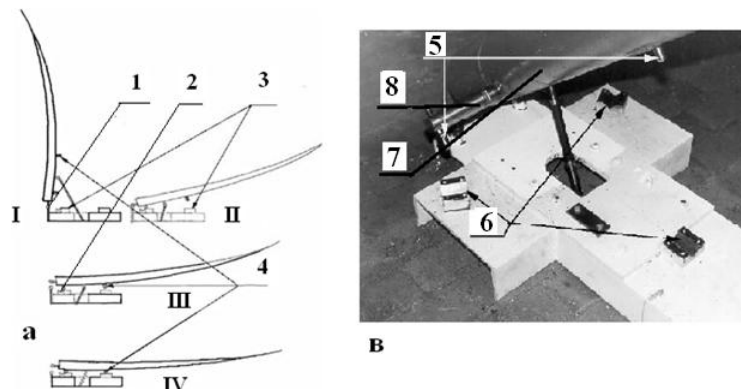


рис. 7. Кинематическая связка в системе раскрытия лепестка.

а – схема высокоточного раскрытия. Этапы раскрытия: I- транспортное положение лепестка, II – этап низкоточного раскрытия, III – IV – этапы высокоточной фиксации конечного состояния, 1 – ось вращения лепестка на этапе раскрытия, 2 - ось вращения лепестка при фиксации конечного состояния, 3 - V –образные элементы опирания, 4 – шаровые опоры.

в – физическая модель кинематической связки системы раскрытия лепестка. 5 – шаровые опоры, 6 – V – образные пазы, 7 - имитатор лепестка, 8- ось вращения имитатора лепестка

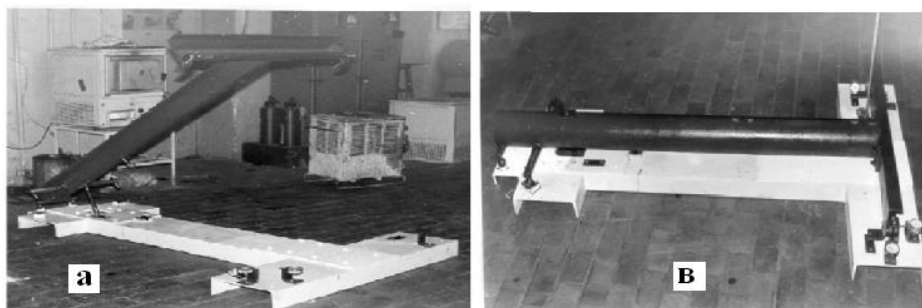


рис. 8. Физическое моделирование системы раскрытия лепестка, а - имитатор лепестка в процессе раскрытия, в - имитатор лепестка в раскрытом состоянии

Заключение

Классические кинематические связки и их модификации открывают новые интересные возможности при разработке самоустанавливающихся замков для решения задач сборки и раскрытия составных твердотельных зеркал. В работе предложены новые конструкции самоустанавливающихся замков статически определимого типа для условий невесомости и представлены результаты их физического моделирования.

Литература

1. Maxwell, J.C. Scientific Papers of J. C. Maxwell, V. 2, edited by W.D. Niven, Cambridge University Press, London, 1890, pp. 507-508.
2. Slocum A.H. The design of three groove kinematic couplings. // Precision Engineering. 1992; V.14, Issue 3, pp.:67-73.
3. Culpepper M. Design of Quasi-Kinematic Couplings // Precision Engineering, 2004, V. 28, Issue 3, pp. 338-35.
4. Barraja, M. and Vallance, R. Tolerancing kinematic couplings // Precision Engineering, 2005, V. 29, No. 1, pp. 101 – 112.
5. Slocum A.H. ., Kinematic Couplings: A Review of Design Principles and Applications. // Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, V 50, №.4, pp. 310-327.
6. Hart A.J., Slocum A.H., Willoughby P . Kinematic coupling interchangeability // Precision Engineering, 2004, V.28, №1, pp. 1–15.
7. Кардашев Н.С., Андреянов В.В., Буякас В.И., Виноградов И.С., Гвамичава А.С. . Проект “Миллиметрон // Труды Физического ин-та им. П.Н. Лебедева. 2000, т.228, 112-128.
8. Peterson L.D., Hinkle J.D. Technology for Earth Observing Deployed Lidar Telescope. // Proceedings of the Sixth Annual NASA Earth Science Technology Conference, Maryland, USA, 2006.
9. Arkhipov M. Yu, Baryshev A.M., Kardashov N.S . Deployable Antennas for Space Radi Telescope: Radioastron and Millimetron Missions // Proceedings of 30th ESA Antenna Workshop, ESTEC, Noordwijk, Netherlands, 2008, pp.125-134.
10. Westphal M., Dornier System GmbH. Petal type deployable reflecto // US Patent №4,899,167 , 1990.
11. Кардашев Н. С., Хартов В. В., Абрамов В. В., Авдеев В. Ю. // Астрономический журнал, 2013, т. 90, №3, с. 179-222.
12. Буякас. В.И. Раскрывающаяся антенна/// Патент Р.Ф. №126199, 2013.
13. Bujakas V.I., Kamensky A. A. Self-setting locks for petal type deployable space reflector // Proceedings of MAMM-2016, Springer, 2016, Ilmenau, Germany, pp. 177-189.
14. Bujakas V.I., Rybakova A.G. High precision deployment and shape correction of multimirror space designs // Proceedings of IUTAM/IASS Deployable Structures Symposium, Cambridge, Kluwer acad. publish.2000, pp. 55-63.