

Механика

УДК 531.133.1

О форме сопрягаемых кромок центральной и периферийной панелей складного прецизионного параболического зеркала антенны

С.Н. Саяпин

ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН»

On the shape of mating edges of the central and peripheral panels of the folding precision parabolic antenna mirror

S.N. Sayapin

Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Наличие конструктивных зазоров между стыкуемыми кромками панелей складных параболических зеркал антенны приводит к проникновению радиоизлучения из ее заднего полупространства и уменьшению коэффициента использования поверхности, что требует применения специальных защитных устройств. Поэтому одним из важных требований к складным прецизионным параболическим зеркалам антенн является обеспечение минимального зазора между сопрягаемыми кромками центральной и периферийной панелей после раскрытия. Предложен метод определения геометрических параметров сопрягаемых кромок центральной и периферийной панелей при использовании сферического механизма раскрытия. Получена форма сопрягаемых кромок, позволяющая уменьшить зазор между ними путем обеспечения их взаимного скольжения в процессе раскрытия и стыковки. На основе предложенного метода разработана управляющая программа для трехкоординатного продольно-фрезерного расточного станка 6М616 с числовым программным управлением. Эта программа позволяет автоматизировать процессы разметки на формообразующих поверхностях матриц контурных линий сопрягаемых кромок центральной и периферийной крупногабаритных панелей и непосредственной обработки сопрягаемых кромок на их заготовках.

EDN: NLSBKE, <https://elibrary/nlsbke>

Ключевые слова: складные антенны, жесткие панели, поверхность второго порядка, форма сопрягаемых кромок

Structural gaps between joining edges of the folding parabolic antenna mirror panels inevitably lead to the radio emission penetration from its rear half-space and to a decrease in the surface utilization coefficient, which requires introduction of the special protective devices. Therefore, one of the important requirements to the folding precision parabolic antenna

mirrors lies in ensuring a minimum gap between the mating edges of the central and peripheral panels after deployment. The paper proposes a method to determine geometric parameters of the mating edges of the central and peripheral panels using the spherical opening mechanism. The resulting shape of the mating edges reduces the gap between them by ensuring their mutual sliding during opening and mating. Based on the proposed method, a control program was developed for the three-axis longitudinal milling boring machine 6M616 with the CNC. The program made it possible to automate the marking processes on the form-forming surfaces of matrices of the contour lines of the mating edges with the central and peripheral large-sized panels and direct machining of the mating edges on their workpieces.

EDN: NLSBKE, <https://elibrary/nlsbke>

Keywords: folding antennas, rigid panels, second-order surface, mating edges shape

Складные зеркала лепесткового типа, рабочая поверхность которых выполнена из жестких формообразующих панелей, применяют преимущественно в раскрываемых на орбите крупногабаритных космических радиотелескопах и сверхвысокочастотных антеннах, а также в составе наземных мобильных радиолокационных комплексов быстрого развертывания [1–7].

Наибольшее распространение получили складные антенны (рис. 1) с осесимметричной укладкой периферийных панелей (ПП) относительно центральной (ЦП). Складное зеркало представляет собой жесткие высокоточные формообразующие ЦП 1 и кинематически связанные с ним через механизмы раскрытия ПП 2–4, образующие после раскрытия и фиксации цельную параболическую поверхность.

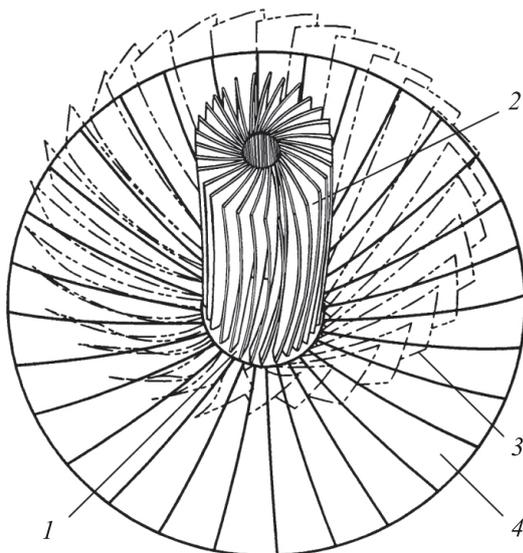


Рис. 1. Внешний вид складного прецизионного параболического зеркала антенны с осесимметричной укладкой формообразующих панелей:

1 — ЦП; 2, 3 и 4 — ПП в сложенном, промежуточном и раскрытом положении соответственно

В процессе раскрытия (складывания) рабочей поверхности зеркала складной антенны, например, космического радиотелескопа, каждая из ПП одновременно поворачивается относительно ЦП вокруг двух взаимно перпендикулярных осей, одна из которых перпендикулярна меридиональной плоскости, а вторая совпадает с продольной осью ПП [1–3, 5].

При этом внутренняя кромка ПП совершает сложное пространственное движение относительно наружной кромки ЦП и возможен один из трех случаев их взаимодействия: движение с гарантированным зазором, с заклиниванием и со скольжением внутренней кромки лепестка по наружной кромке центрального зеркала.

В первом случае наличие зазора между внутренней кромкой лепестка и наружной кромкой центрального зеркала неизбежно приведет к образованию в раскрытом положении зеркала антенны кольцевой щели и, как следствие, к проникновению радиоизлучения из ее заднего полупространства, что потребует применения специальных защитных устройств, усложняющих конструкцию складного зеркала. Кроме того, уменьшается коэффициент использования поверхности антенны.

Во втором случае для преодоления заклинивания взаимодействующие друг с другом участки сопрягаемых кромок ЦП и ПП необходимо выполнить с обратимой податливостью, например в виде упругих элементов, что приведет к усложнению конструкции складного зеркала антенны.

В третьем случае при раскрытии (складывании) лепестка происходит движение со скольжением его внутренней кромки по наружной кромке центрального зеркала, обеспечивающее возможность выполнения между ними мини-

мального ходового зазора, удовлетворяющего радиотехническим требованиям зеркала антенны в раскрытом положении и не приводящего к усложнению конструкции.

Цель исследования — разработка формы сопрягаемых кромок ЦП и ПП складного прецизионного параболического зеркала антенны, обеспечивающей в процессе раскрытия ПП движение их внутренних кромок по наружной кромке ЦП со скольжением и, как следствие, минимальный ходовой зазор между ними, удовлетворяющий радиотехническим требованиям зеркала антенны в раскрытом положении и не требующей введения каких-либо дополнительных элементов и устройств.

Разработка формы сопрягаемых кромок центральной и периферийной панелей, обеспечивающей движение со скольжением. Для реализации указанного движения необходимо и важно определить характер движения внутренней кромки ПП относительно наружной кромки ЦП и форму линии сопряжения при использовании сферических механизмов раскрытия ПП [2, 3].

Отличительной особенностью любого сферического механизма является то, что все точки

его подвижных звеньев, не равноудаленные от центра вращения, имеют траектории на сферических эквидистантных поверхностях, а все постоянные и мгновенные оси вращения подвижных звеньев пересекаются в одной точке [8, 9]. На основании этого сформулирована теорема о движении со скольжением внутренней кромки подвижной ПП складного зеркала параболической антенны по сопрягаемой с ней наружной кромке его неподвижной ЦП.

Схемы ЦП и ПП раскрытого параболического зеркала антенны приведены на рис. 2, а и б, где ЛС — линия сопряжения ЦП и ПП.

Для наглядности параболическое зеркало принято короткофокусным, когда фокус F находится внутри объема между рабочей поверхностью зеркала и его раскрывом (фокусное расстояние параболы $f < D/4$ и угол раскрыва $2\Theta_{\max} > \pi$) [10], а зеркало изображено с одной ПП и линией ее сопряжения с ЦП. При этом остальная часть наружной кромки ЦП и сопрягаемые с ней ПП условно не показаны.

Теорема. Движение со скольжением внутренней кромки подвижной ПП по наружной кромке неподвижной ЦП при одновременном повороте ПП относительно двух взаимноперпендикулярных осей пересекающихся в не-

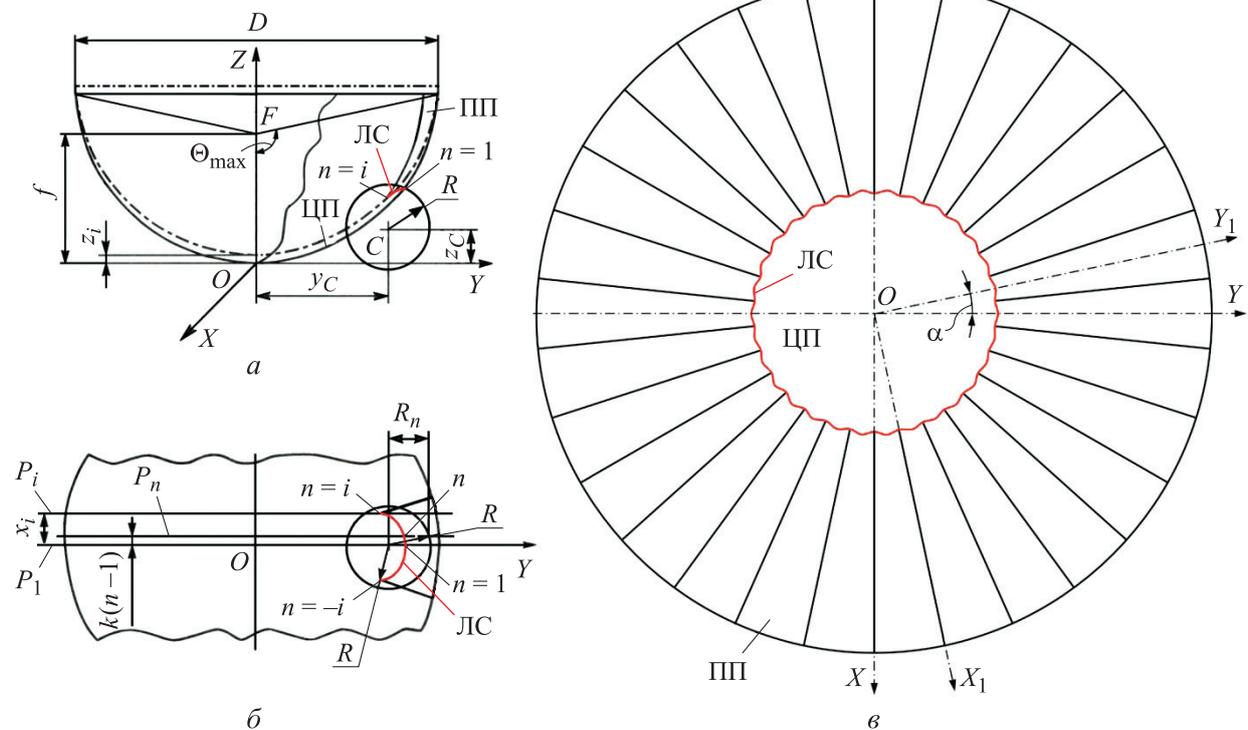


Рис. 2. Схемы ЦП и ПП раскрытого параболического зеркала антенны: а — вид спереди; б — вид сверху (остальные ПП и наружная кромка ЦП условно не показаны); в — вид сверху (количество ПП соответствует зеркалу антенны, изображенному на рис. 1)

подвижном центре сферического механизма раскрытия, кинематически связывающего ЦП и ПП, возможно тогда и только тогда, когда линия их сопряжения образована пересечением складной поверхности второго порядка со сферой, центр которой совпадает с центром сферического механизма, а поверхность сферы касается точек пересечения боковых кромок ПП с наружной кромкой центральной части.

Действительно, если поверхность второго порядка зеркала антенны выполнена в виде ЦП, соединенной со складывающимися ПП, линия сопряжения которых в раскрытом положении является одновременно наружной кромкой ПП и внутренней кромкой ЦП и образована пересечением поверхности второго порядка с поверхностью сферы радиусом R (см. рис. 2, *a* и *б*), имеющего начало в неподвижном центре сферического механизма, а конец в точках пересечения боковых кромок складывающейся ПП с наружной кромкой неподвижной ЦП, то все точки, принадлежащие линии сопряжения и совпадающими с ней кромками, лежат на одной и той же сфере радиусом R , центр которой совпадает с центром сферического механизма.

При этом внутренняя кромка складывающейся ПП с поверхностью второго порядка является подвижным звеном такого сферического механизма. Следовательно, все ее точки при движении относительно его центра будут скользить по поверхности сферы радиусом R и, соответственно, по наружной кромке неподвижной ЦП с поверхностью второго порядка. Таким образом, их взаимное движение, организованное с помощью сферического механизма будет происходить со скольжением, что и требовалось доказать.

Лемма. Линия сопряжения смежных участков поверхности параболоида вращения, образованная его пересечением сферой, центр которой не лежит на его оси, не является дугой окружности.

Предположим, что указанная линия сопряжения с лежащими на ней точками $n = i$, $n = 1$ и $n = -i$ является дугой окружности (см. рис. 2, *a* и *б*). Тогда секущая плоскость, проходящая через эти точки, лежащие на поверхностях параболоида вращения и сферы, должна пересекать их по окружности. В действительности непараллельная оси параболоида вращения секущая плоскость пересекает его по эллипсу, параллельная — по параболе, а перпендику-

лярная — по окружности [10–14], что и требовалось доказать.

Следствие. Линия сопряжения, образованная пересечением поверхности параболоида вращения и сферы, является дугой окружности, когда центр сферы лежит на его оси.

Таким образом, установлено, что линии сопряжения складывающихся ПП и неподвижной ЦП, образующих в раскрытом положении параболическое зеркало антенны, не являются дугами окружностей. Поэтому требуется дискретное вычисление координат лежащих на них точек с требуемым шагом, определяющих положение линий сопряжения в пространстве для последующих разметки и изготовления сопрягаемых кромок ПП и ЦП из условия обеспечения из взаимных движений со скольжением, организуемых сферическими механизмами раскрытия ПП.

Рассмотрим метод, позволяющий дискретно определять с требуемым шагом координаты точек, лежащих на линии сопряжения. В основу метода положено свойство параболоида вращения образовывать одинаковые параболы при его сечении плоскостями, параллельными его оси [11, 13, 14].

Составим систему уравнений, включающую в себя уравнения параболы и окружности радиусом R с координатами центра y_c и z_c , образованной сечением параболоида вращения плоскостью ZOY (см. рис. 2, *a* и *б*). Центр окружности совпадает с центром сферического механизма раскрытия ПП. Система уравнений имеет вид

$$\begin{cases} Y^2 = 4fZ; \\ (Y - y_c)^2 + (Z - z_c)^2 = R^2. \end{cases} \quad (1)$$

Решение системы уравнений (1) позволяет найти координаты двух точек пересечения окружности и параболы, причем точка $n = 1$ лежит на линии сопряжения наружной кромки ЦП и внутренней кромки ПП.

Для отыскания следующих точек проводим с шагом k секущие плоскости $P_1, \dots, P_n, \dots, P_i$, параллельные плоскости ZOY (см. рис. 2, *a* и *б*). Значение шага k выбираем так, чтобы последняя секущая плоскость P_i прошла через точку пересечения боковой кромки ПП с наружной кромкой ЦП ($n = i$).

Для определения координат любой точки, например n , лежащей на линии сопряжения в интервале $[1, i]$ ($1 \leq n \leq i$), составим систему уравнений (1).

Из геометрических построений (см. рис. 2) получаем

$$\begin{cases} R_n^2 = R^2 - [k(n-1)]^2; \\ X_n = k(n-1). \end{cases} \quad (2)$$

С учетом первой формулы системы (2) из уравнения параболы, образованной пересечением параболоида вращения секущей плоскостью P_n , параллельной плоскости ZOY и проходящей через точку n , определяем смещение ее вершины для точки n

$$Z_n = \frac{X_n^2}{4f} = \frac{[k(n-1)]^2}{4f}. \quad (3)$$

Для решения системы уравнений (1) по формулам (2) и (3) определяют значения R_n , X_n и Z_n .

Нахождение координат точек n , лежащих на рассматриваемой линии сопряжения в интервале $[1, i]$ с выбранным шагом k , позволяет определить ее форму в пространстве, необходимую для проведения разметки сопрягаемых кромок ЦП и ПП на формообразующих матрицах или их механической обработки в процессе изготовления [15, 16].

Для отыскания координат точек, лежащих на линиях сопряжения остальных ПП с ЦП необходимо и достаточно осуществить поворот системы координат $OXYZ$ относительно оси OZ на угол α , например в положение OX_1Y_1Z (рис. 2, в). Здесь $\alpha = 2\pi N/n$, где n — общее количество ПП; N — порядковый номер ПП по направлению поворота системы координат $OXYZ$ относительно оси OZ , начиная с нулевого (исходного). После построения линий сопряжения всех лепестков с центральным зеркалом наружная кромка последнего принимает вид ромашки [2].

Механическую обработку сопрягаемых кромок ЦП и ПП, изготовленных ненапряженным способом, выполняют вручную по отпечаткам на их рабочей поверхности контурных линий кромок, размеченных на формообразующей

поверхности матриц в случае изготовления ЦП и ПП из волокнистых полимерных композиционных материалов. Эту операцию также можно провести непосредственно на трехкоординатных фрезерных станках без предварительной разметки контурных линий кромок [2, 14–16].

Вид сверху на складное прецизионное параболическое зеркало антенны в раскрытом положении с линией сопряжения ЦП и ПП, обеспечивающей движение со скольжением внутренних кромок ПП по сопрягаемой наружной кромке ЦП, показан на рис. 2, в.

На основе метода определения формы и пространственного положения линии сопряжения ЦП и ПП складной параболической антенны при сферическом механизме раскрытия ПП разработана управляющая программа для трехкоординатного продольно-фрезерного расточного станка 6М616 с ЧПУ.

Размеры рабочего стола 1600×5000 мм и максимальная высота обрабатываемой детали 1200 мм позволяют автоматизировать процессы разметки на формообразующих поверхностях матриц контурных линий сопрягаемых кромок крупногабаритных ЦП и ПП, а также непосредственной обработки сопрягаемых кромок на их заготовках [10, 16].

Выводы

1. Предложен метод определения формы и пространственного положения линии сопряжения ЦП и ПП складной параболической антенны при сферическом механизме раскрытия ПП.

2. На основе предложенного метода разработана управляющая программа для трехкоординатного продольно-фрезерного расточного станка 6М616 с ЧПУ, позволяющая автоматизировать процессы разметки на формообразующих поверхностях матриц контурных линий сопрягаемых кромок крупногабаритных ЦП и ПП, а также непосредственной обработки сопрягаемых кромок на их заготовках.

Литература

- [1] Guest S.D., Pellegrino S. A new concept for solid surface deployable antennas. *Acta astronaut.*, 1996, vol. 38, no. 2, pp. 103–113, doi: [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(96\)00009-4](https://doi.org/10.1016/0094-5765(96)00009-4)
- [2] Саяпин С.Н. Анализ и синтез раскрываемых на орбите прецизионных крупногабаритных механизмов и конструкций космических радиотелескопов лепесткового типа. Дисс. ... док. тех. наук. Москва, ИМАШ РАН, 2003. 457 с.

- [3] Sayapin S.N., Shkapov P.M. Kinematics of deployment of petal-type large space antenna reflectors with axisymmetric petal packaging. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2016, vol. 45, no. 5, pp. 387–397, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618816050137>
- [4] He H., Guang F.-L., Pan L.-L. et al. Design and deploying study of a new petal-type deployable solid surface antenna. *Acta Astronaut.*, 2018, vol. 148, pp. 99–110, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.04.042>
- [5] Arkhipov V.A., Savel'ev A.V., Smirnov Y.A. et al. Solving the problem of the deployment kinematics of a large petal reflector. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2020, vol. 49, no. 9, pp. 796–801, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618820090034>
- [6] Duan B., Zhang Y., Du J. Large deployable satellite antennas. *Springer*, 2020. 271 p.
- [7] Tan G., Duan X., Yang D. et al. Parametric design optimization approach to petal-type solid surface deployable reflectors. *Acta Astronaut.*, 2022, vol. 197, pp. 280–297, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.02.032>
- [8] Крайнев А.Ф. *Словарь — справочник по механизмам*. Москва, Машиностроение, 1987. 560 с.
- [9] Артоболовский И.И. *Теория механизмов и машин*. Москва, Наука, 1988. 640 с.
- [10] Сазонов Д.М. *Антенны и устройства СВЧ*. Москва, Высшая школа, 1988. 432 с.
- [11] Борисов А.А., Парщиков А.А. Конструкция, технология изготовления и методика контроля отражающей поверхности антенны радиотелескопа РТ-16 МГТУ. В: *Конструкции зеркальных антенн. Ч. 1. Доклады Рижского совещания URSI*. Рига, Зинатне, 1990, с. 221–227.
- [12] Делоне Б.Н., Райков Д.А. *Аналитическая геометрия*. Т. 2. Москва, Ленинград, Гостехиздат, 1949. 516 с.
- [13] Ильин В.А., Позняк Э.Г. *Аналитическая геометрия*. Москва, Наука, 1988. 224 с.
- [14] Беклемишев Д.В. *Курс аналитической геометрии и линейной алгебры*. Москва, Наука, 1984. 320 с.
- [15] Поляк В.С., Бервалдс Э.Я. *Прецизионные конструкции зеркальных радиотелескопов*. Рига, Зинатне, 1990. 526 с.
- [16] Саяпин С.Н., Брындина О.О., Ванина П.Г. Новый подход к трехкоординатному фрезерованию крупногабаритных поверхностей второго порядка. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 12, с. 19–28, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-12-19-28>

References

- [1] Guest S.D., Pellegrino S. A new concept for solid surface deployable antennas. *Acta astronaut.*, 1996, vol. 38, no. 2, pp. 103–113, doi: [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(96\)00009-4](https://doi.org/10.1016/0094-5765(96)00009-4)
- [2] Sayapin S.N. *Analiz i sintez raskryvaemykh na orbite pretsizionnykh krupnogabaritnykh mekhanizmov i konstruksiy kosmicheskikh radioteleskopov lepestkovogo tipa*. Diss. dok. tekhn. nauk [Analysis and synthesis of on-orbit precision large-size mechanisms and structures of space radio telescopes of petal type. Doc. tech. sci. diss.]. Moscow, IMASH RAN, 2003. 457 p. (In Russ.).
- [3] Sayapin S.N., Shkapov P.M. Kinematics of deployment of petal-type large space antenna reflectors with axisymmetric petal packaging. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2016, vol. 45, no. 5, pp. 387–397, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618816050137>
- [4] He H., Guang F.-L., Pan L.-L. et al. Design and deploying study of a new petal-type deployable solid surface antenna. *Acta Astronaut.*, 2018, vol. 148, pp. 99–110, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.04.042>
- [5] Arkhipov V.A., Savel'ev A.V., Smirnov Y.A. et al. Solving the problem of the deployment kinematics of a large petal reflector. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2020, vol. 49, no. 9, pp. 796–801, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618820090034>
- [6] Duan B., Zhang Y., Du J. Large deployable satellite antennas. *Springer*, 2020. 271 p.
- [7] Tan G., Duan X., Yang D. et al. Parametric design optimization approach to petal-type solid surface deployable reflectors. *Acta Astronaut.*, 2022, vol. 197, pp. 280–297, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.02.032>

- [8] Kraynev A.F. *Slovar — spravochnik po mekhanizamam* [Dictionary — reference book on mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 560 p. (In Russ.).
- [9] Artobolevskiy I.I. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 640 p. (In Russ.).
- [10] Sazonov D.M. *Antenny i ustroystva SVCh* [Antennas and devices of UHF]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 432 p. (In Russ.).
- [11] Borisov A.A., Parshchikov A.A. *Konstruktsiya, tekhnologiya izgotovleniya i metodika kontrolya otrazhayushchey poverkhnosti anteny radioteleskopa RT-16 MGTU* [Design, manufacturing technology and method of control of the reflecting surface of the antenna of the radio telescope RT-16 MSTU]. V: *Konstruktsii zerkalnykh antenn. Ch. 1. Doklady Rizhskogo soveshchaniya URSI* [In: Mirror antennae constructions. P. 1. Reports of URSI meeting in Riga]. Riga, Zinatne Publ., 1990, pp. 221–227. (In Russ.).
- [12] Delone B.N., Raykov D.A. *Analiticheskaya geometriya. T. 2* [Analytical geometry. Vol. 2]. M., Leningrad, Gostekhizdat Publ., 1949. 516 p. (In Russ.).
- [13] Ilin V.A., Poznyak E.G. *Analiticheskaya geometriya* [Analytical geometry]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 224 p. (In Russ.).
- [14] Beklemishev D.V. *Kurs analiticheskoy geometrii i lineynoy algebrы* [Course of analytical geometry and linear algebra]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 320 p. (In Russ.).
- [15] Polyak V.S., Bervalds E.Ya. *Pretsizionnye konstruktsii zerkalnykh radioteleskopov* [Precision constructions of mirror radio telescopes]. Riga, Zinatne Publ., 1990. 526 p. (In Russ.).
- [16] Sayapin S.N., Bryndina O.O., Vanina P.G. New approach to three-coordinate milling of large-sized surfaces of second order. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2021, no. 12, pp. 19–28, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-12-19-28> (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 29.12.2023

Информация об авторе

САЯПИН Сергей Николаевич — доктор технических наук, главный научный сотрудник. ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН» (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский пер., д. 4, e-mail: S.Sayapin@rambler.ru).

Information about the author

SAYAPIN Sergey Nikolaevich — Doctor of Science (Eng.), Chief Research Worker. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonyevskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: S.Sayapin@rambler.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Саяпин С.Н. О форме сопрягаемых кромок центральной и периферийной панелей складного прецизионного параболического зеркала антенны. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 4, с. 3–9.

Please cite this article in English as:

Sayapin S.N. On the shape of mating edges of the central and peripheral panels of the folding precision parabolic antenna mirror. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 4, pp. 3–9.