

## ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Д.А. Даньшин

dany.danshin@bk.ru

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

---

### Аннотация

*Системы позиционирования очень широко применяются в самых различных машинах, приборах и устройствах. Система позиционирования (подвижка) предназначена для перемещения изделия в пределах рабочего пространства по одной или нескольким координатам. Целью исследования является разработка двухкоординатной подвижки для устройств космической техники, к которым предъявляются специальные требования. Статья посвящена обзору систем позиционирования, разработке их классификатора, а также выбору исполнительного механизма подвижки. С учетом специальных требований выбрана подвижка с электромеханическим исполнительным механизмом. После обзора и анализа этих механизмов выбран безззорный планетарный роликовинтовой механизм с гибкой гайкой, деформируемой осевыми силами. Его расчеты и исследования будут проведены в дальнейшем в ходе подготовки выпускной квалификационной работы.*

### Ключевые слова

*Космическая техника, система позиционирования, координаты, точность, исполнительный механизм, роликовый механизм, оболочка, безззорный механизм*

Поступила в редакцию 07.12.2023

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

---

**Введение.** Машиностроение является ведущей отраслью мировой промышленности, которая оказывает колоссальное влияние на уровень развития той или иной страны. Эта отрасль занимается производством различных машин, станков, механизмов, приборов, и состоит из множества подотраслей, тесно связанных между собой. Без машиностроения другие отрасли промышленности просто не могли бы существовать.

Основная задача машиностроения — удовлетворение растущих потребностей человечества. Для этого, в том числе, необходимы разработка новых более совершенных машин, использование новых материалов, внедрение высокопроизводительных технологий, автоматизация и роботизация производства с целью повышения качества и надежности машин и оборудования.

Для разработки новой машины или механизма нужна потребность в этом изделии, которая перерабатывается в техническое предложение, учитывающее ожидаемый результат и экономический эффект от его внедрения. Заказчик должен разработать техническое задание — документ, в котором грамотно

и четко обозначить все технические, эксплуатационные и экономические параметры будущего изделия. Далее заказчик и исполнитель обсуждают и конкретизируют этот документ, определяют и оценивают имеющиеся аналоги и пути реализации данного задания. Затем следует разработка эскизного проекта, технического проекта и итоговой расчетно-конструкторской документации, необходимой для изготовления опытного образца изделия [1].

**Классификация машин и механизмов.** В курсе «Теория машин и механизмов» машины подразделяют на энергетические, рабочие (к ним относятся транспортные и технологические машины), информационные и кибернетические [2].

В работе рассмотрены транспортные машины, в которых для изменения положения объекта (его координат) используется механическая энергия. Для изменения положения объекта нужны исполнительные механизмы различных конструкций, представляющие собой части различных машин.

Исполнительные механизмы, имеющие входное и выходное звенья, подразделяют по целому ряду параметров, в том числе по сочетанию движений входного и выходного звеньев [3]. Чаще других применяют механизмы, в которых входное и выходное звенья совершают вращательное движение. Этот исполнительный механизм характеризуется передаточным отношением, КПД и другими характеристиками, он изменяет кинематические и силовые параметры от входного звена к выходному. Количество конструкций таких механизмов (передат) достаточно велико, т. е. для заданных условий эксплуатации можно выбрать рациональную конструкцию. К ним относятся зубчатые передачи, червячные передачи, волновые передачи, ременные передачи, цепные передачи и др. [3].

К другой группе исполнительных механизмов относятся такие, в которых кроме вариации кинематических и силовых параметров от входного звена к выходному происходит преобразование вращательного движения входного звена в поступательное движение выходного звена. Такие механизмы, в которых доминируют винтовые передачи, вместе с электродвигателями образуют линейные приводы, или актуаторы [4]. В работе рассмотрены линейные приводы на базе винтовых механизмов.

**Постановка задачи и требования к объектам исследования.** Ставится задача по разработке двухкоординатной системы позиционирования (подвижки) для изделий космической техники.

Известно, что к изделиям космической техники предъявляются специальные требования.

В первую очередь изделия должны обладать наименьшей массой и габаритами, поскольку вывод полезной нагрузки на геостационарную орбиту очень дорогой, и габариты космического аппарата не большие. При этом все основные критерии работоспособности этих изделий и их составных частей должны обеспечены.

Во вторую очередь по причине высокой стоимости вывода на орбиту изделий необходимо обеспечить на стадии проектирования их высокую надежность и долговечность.

В третью очередь проектируемые изделия космической техники должны иметь максимально достигаемый КПД из-за ограниченных возможностей пополнять энергетические ресурсы космических аппаратов.

В условиях космического пространства смазывание подвижных узлов механизмов становится проблематичным. Это необходимо учесть. Кроме того, в исполнительном механизме разрабатываемой системе позиционирования не допускаются люфты.

**Цель и задачи дальнейших исследований.** Цель — учитывая предъявляемые к объектам исследования требования, выбрать ближайший аналог двухкоординатной системы позиционирования и конструкцию исполнительного механизма для этой системы, выполнить необходимые расчеты и разработать конструкторскую документацию для изготовления основных деталей опытного образца этой системы.

Для реализации поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- а) выполнить обзор систем позиционирования с разработкой их классификатора;
- б) разработать архитектуру разрабатываемой двухкоординатной системы позиционирования для изделий космической техники;
- в) на основании обзора исполнительных механизмов для линейных приводов выбрать конструкцию, отвечающую предъявляемым требованиям;
- г) выполнить расчеты выбранной конструкции исполнительного механизма по обеспечению критериев работоспособности;
- д) провести расчеты основных размеров с полями допусков для важнейших деталей выбранной конструкции исполнительного механизма;
- е) разработать конструкторскую документацию на сборочный чертеж конструкции исполнительного механизма и рабочие чертежи ее деталей.

Отметим, что данная статья базируется на исследовательской части выпускной квалификационной работы магистранта и в ней приведены только обзоры систем позиционирования и винтовых исполнительных механизмов этих систем (см. выше задачи исследования а и в). В дальнейшем предполагается решить все перечисленные задачи.

**Обзор систем позиционирования (подвижек).** С помощью системы позиционирования можно перемещать изделие в пределах рабочего пространства с заданной точностью. При этом изделие может быть установлено или закреплено на детали (столе) подвижки или соединено с деталью подвижки. Системы позиционирования очень широко применяются в технологическом оборудовании, робототехнике, измерительных устройствах, системах слежения, медицинской технике, микроскопах, устройствах для выращивания кристаллов, принтерах, сканерах и т. д. Области их применения в технологическом оборудовании —

различные обрабатывающие станки, сварочные аппараты, устройства для лазерного раскроя, в фасовочно-упаковочные машины, гравировальная техника, сборочное оборудование и многие другие устройства.

Подвижки можно классифицировать по различным признакам. Главным признаком является *число координат*, по которым перемещается изделие. Подвижки бывают однокоординатные, двухкоординатные (рис. 1), трехкоординатные и многокоординатные. Последние, кроме движения по трем осям, могут вращаться вокруг осей или двигаться по сложным траекториям. Выбор числа координат зависит от поставленной задачи.



Рис. 1. Подвижка:

*a* — однокоординатная; *б* — двухкоординатная

Вторым классификационным признаком является *принцип действия*. Используются подвижки следующих видов:

а) *электромеханические подвижки*. В этих подвижках для перемещения изделий применяют электрические двигатели и механические исполнительные механизмы, как правило, винтовые. Они обеспечивают точное и контролируемое движение;

б) *пневматические подвижки*. В них для перемещения изделий используется сжатый воздух. Пневматические подвижки характеризуются высокой скоростью перемещения и относительной простотой в управлении;

в) *гидравлические подвижки*. Они работают на основе передачи давления жидкости через гидравлические цилиндры, что обеспечивает большую грузоподъемность и мощность. Гидравлические подвижки применяются там, где требуется большая сила и точность;

г) *линейные электродвигатели*. В этих системах позиционирования для прямого перемещения изделий вдоль линейного направления используются электромагнитные поля. Они обеспечивают высокую точность и скорость движения;

д) *гравитационные подвижки*. В них изделия перемещаются по инерции, а гравитационные силы используются для управления и контроля движением. Примером может служить грузоподъемное устройство, работающее на принципе «блок и трос»;

е) *магнитные подвижки*. В этих системах позиционирования для перемещения изделий применяются магниты и магнитное поле. Магнитные подвижки могут быть использованы в системах магнитной левитации и транспортировке.

Третий классификационный признак — *конструктивный*. Например, подвижки могут быть плоскими (см. рис. 1, а), порталными или иметь другую конфигурацию. Они могут иметь специальный корпус, а могут и не иметь. В последнем случае части подвижки соединяются исполнительными механизмами и направляющими (рис. 2).

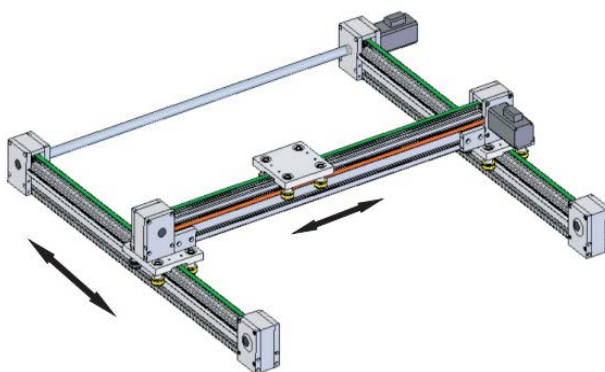


Рис. 2. Двухкоординатная подвижка

Четвертым классификационным признаком является *наличие и вид обратной связи*. Для повышения точности позиционирования используют обратную связь. Если в подвижке используется винтовой исполнительный механизм, то обратная связь может быть для его входного звена или для выходного звена. Если использовать обратную связь по углу поворота входного звена с помощью энкодера, то такая связь будет простой и дешевой, но не достаточно точной для позиционирования. Для повышения точности позиционирования рекомендуется использовать обратную связь по линейной координате выходного звена с помощью датчиков линейного перемещения (аналоговых, цифровых, оптических и т. д.), которые сложнее и дороже энкодера [5].

**Выбор конструкции системы позиционирования.** На основе анализа разработанного классификатора и с учетом исходных данных выберем двухкоординатную конструкцию подвижки.

Анализируя различные принципы действия подвижек, следует отметить, что линейные электродвигатели, гравитационные подвижки и магнитные подвижки не годятся для изделий космической техники. Если сравнивать

электромеханические подвижки с пневматическими и гидравлическими, то для двух последних необходимо будет преобразовывать основную для космического аппарата электрическую энергию (источники энергии солнечные и аккумуляторные батареи) в пневматическую и гидравлическую энергию. Пневмоприводы обладают низкой жесткостью, точностью и надежностью, поэтому для космических изделий они не должны применяться. Для гидроприводов нужно дополнительное оборудование: масляный бак, гидронасос, гидравлические коммуникации и распределитель, фильтры, клапана и т. д. Кроме того, электромеханический привод обеспечивает: более высокую стабильность эксплуатационных параметров его выходного звена; возможность создания более простой, надежной и достоверной обратной связи; простоту автоматизации процесса управления, а при необходимости позволяет легко программировать процесс управления. И наконец, электромеханический привод проще в сборке, хранении и замене и экологически более «чистый» [6]. Поэтому выбираем электромеханический исполнительный механизм.

Если рассматривать конструктивный признак для разрабатываемой двухкоординатной подвижки с учетом специальных требований к устройствам космической техники, то обойтись без специального корпуса не получится, но при проектировании нужно будет так обрабатывать узлы и детали, чтобы максимально экономить массу и габариты. В первую очередь это будет касаться направляющих.

**Обзор винтовых исполнительных механизмов электромеханических приводов.** Винтовые механизмы известны более двух тысячелетий, но за все это время были разработаны только три принципиальные конструкции этих механизмов. Первой конструкцией является передача «винт — гайка скольжения» [3, 4], показанная на рис. 3. Она состоит из винта 1 и гайки 2, ее основными параметрами являются:  $d_2$  — средний диаметр резьбы;  $\varphi$  — угол подъема резьбы по диаметру  $d_2$ ;  $P$  — шаг резьбы;  $P_h = P \cdot z$  — ход резьбы;  $z$  — число заходов резьбы. Чтобы создать осевую силу  $F_x$ , необходим крутящий момент  $T$ .

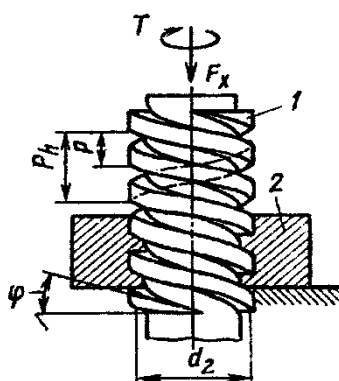


Рис. 3. Винтовая пара «винт — гайка»

К достоинствам передачи «винт — гайка» относятся: простота конструкции; высокая нагрузочная способность при малых габаритах; возможность получить малые точные осевые перемещения; наличие отлаженной технологии, станков, инструмента и оснастки для изготовления винта и гайки и др.

Большая скорость скольжения между сопрягаемыми витками винта и гайки обуславливает следующие недостатки передачи: низкий КПД; большие тепловые выделения; ограничения по скорости и ускорению выходного звена, совершающего поступательное движение; достаточно интенсивный износ гайки; сложность подачи смазки в место взаимодействия витков и ее удержание и другие. Поэтому начиная с XIX в. встал вопрос о разработке новой конструкции винтовой передачи. В самом конце XIX в. была разработана принципиально новая винтовая передача, в которой реализовывалось трение качения вместо трения скольжения. Это стало возможным из-за того, что в конструкцию были введены дополнительные детали (шарики), которые располагаются между винтом и гайкой. Такую передачу назвали шариковинтовым механизмом (ШВМ) [3, 4] — рис. 4.

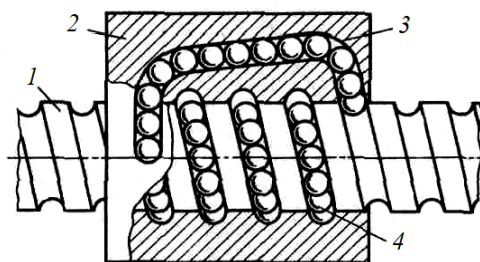


Рис. 4. Шариковинтовой механизм

Применение ШВМ позволило устранить почти все недостатки передачи винт-гайка скольжения. КПД повысился более чем в 2 раза. ШВМ (рис. 4), состоит из винта 1, гайки 2 и шариков 4, которые катятся по винтовым канавкам винта и гайки. Чтобы шарики могли возвращаться в исходное положение и двигаться по замкнутой траектории предусмотрен канал возврата 3. Наличие этого канала является конструктивным усложнением и условием возникновения динамических нагрузок, так как шарики в канале возврата меняют направление вектора своей скорости на противоположное. Невысокими оказались и нагрузочная способность и осевая жесткость ШВМ, поэтому разработки винтовых передач продолжались.

В середине XX в. был разработан роликовинтовой механизм (РВМ), в которой также реализовывается трение качения, только промежуточными деталями между винтом и гайкой являются резьбовые ролики. Если они совершают планетарное движение, то передача называется планетарным роликовинтовым

механизмом (ПРВМ) [3, 4]. На рис. 5 показан ПРВМ, который состоит из многозаходного винта 1, сепаратора 2, пружинных колец 3, препятствующих осевому перемещению сепараторов, многозаходной гайки 4, двух, закрепленных в гайке 4, втулок 5 с внутренними зубчатыми венцами и резьбовыми роликами 6 (их количество от 7 до 14).

На концах каждого ролика прямо по резьбе нарезаны наружные зубчатые венцы, которые сопрягаются с внутренними зубчатыми венцами втулок для того, чтобы стабилизировать движения всех роликов в механизме. При работе ПРВМ винт вращается, ролики вместе с сепараторами вращаются вокруг оси винта, и каждый ролик вращается вокруг собственной оси, обкатываясь по резьбе гайки, а последняя совершает по направляющей (на рис. 5 не показана) поступательное движение.

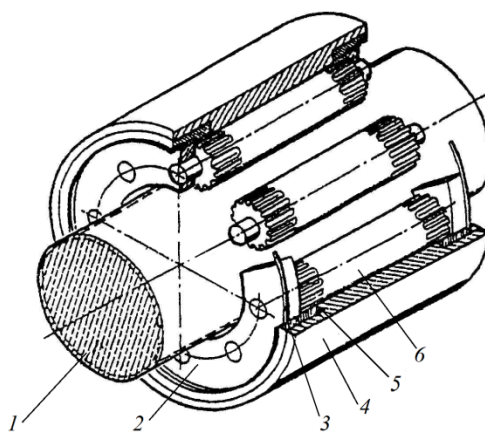
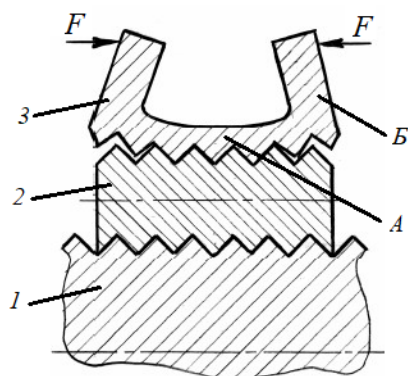


Рис. 5. Планетарный роликовинтовой механизм

Роликовинтовые механизмы, обладая очень высокой нагрузочной способностью, осевой жесткостью и другими высокими эксплуатационными характеристиками, являются в настоящее время самыми перспективными преобразователями вращательного движения в поступательное. Поэтому выберем их в качестве исполнительного механизма для проводимого нами исследования.

Роликовинтовые механизмы имеют целый ряд конструкций и конструктивных исполнений [3, 4], они подразделяются, например, на механизмы с осевым люфтом и беззазорные. Учитывая исходные данные, следует выбрать конструкцию беззазорного РВМ. В работе [7] выполнен обзор беззазорных РВМ. Учитывая специальные требования, предъявляемые к изделиям космической техники, выбираем ПРВМ с гибкой гайкой, выполненной в виде «короткой» цилиндрической оболочки, которая компенсирует зазоры между резьбовыми деталями механизма (гайка, резьбовые ролики и винт) за счет осевых сил  $F$ , создающих изгибающие оболочки моменты. На рис. 6 показана схема этого механизма.





**Рис. 6.** Схема ПРВМ с гайкой, выполненной в виде «короткой» цилиндрической оболочки

Основными деталями ПРВМ с гайкой, выполненной в виде «короткой» цилиндрической оболочки, служат многорезцовый винт 1, резьбовые ролики 2 и гибкая гайка 3, состоящая из участка в виде «короткой» цилиндрической оболочки А и развитых торцов Б, к которым приложены осевые силы  $F$ , деформирующие оболочку изгибающими моментами. Этот механизм является беззазорным и имеет малую массу.

**Выводы.** На основании выполненных обзоров выбраны объекты исследования для выпускной квалификационной работы. Для двухкоординатной системы позиционирования, которая будет использоваться в космическом аппарате, выбраны электромеханические приводы на базе роликовинтовых механизмов.

Роликовинтовые механизмы обладают высокой нагрузочной способностью и являются перспективными преобразователями вращательного движения в поступательное, поэтому их применение в изделиях космической техники является актуальным.

## Литература

- [1] Воячек А.И. *Основы проектирования и конструирования*. Пенза, Пенз. гос. ун-т, 2008, 228 с.
- [2] Тимофеев Г.А., ред. *Теория механизмов и машин*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022, 568 с.
- [3] Ряховский О.А. *Детали машин*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 472 с.
- [4] Блинов Д.С. *Винтовые передачи линейных приводов*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, 199 с.
- [5] Блинов Д.С., Морозов М.И. Проскальзывание в винтовых механизмах качения с люфтом. *Трибология — машиностроению. XIV Междунар. науч.-техн. конф., посв. 100-летию со дня рождения А.П. Семенова: сб. тр.* Москва, ИМАШ РАН, 2022, с. 53–56.

- [6] Алексахин А.А., Леонтьев С.К., Блинов Д.С. и др. Перспективы внедрения электроприводов на базе роликвинтовых механизмов в изделия авиационной техники. *Техника воздушного флота*, 2023, № 2 (711), с. 12–20.
- [7] Блинов Д.С., Егоров О.В., Носов А.С. Обзор известных конструкций беззазорных планетарных роликвинтовых механизмов и разработка новых конструкций с цельной тонкостенной гайкой. *Справочник. Инженерный журнал*, 2018, № 12, с. 17–26.

**Даньшин Даниил Артурович** — магистрант кафедры «Основы конструирования машин», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Блинов Дмитрий Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Основы конструирования машин», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация. E-mail: dmitriyblinov@mail.ru

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Даньшин Д.А. Особенности разработки систем позиционирования для изделий космической техники. *Политехнический молодежный журнал*, 2023, № 12 (89).

<http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-12-958>

## SPECIFICS IN THE POSITIONING SYSTEMS DEVELOPMENT FOR THE SPACE TECHNOLOGY PRODUCTS

D.A. Danshin

dany.danshin@bk.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

Positioning systems are widely used in a wide variety of machines, instruments and devices. The positioning system (displacement) is designed to move the product within the workspace along a single or more coordinates. The research purpose lies in developing a two-coordinate displacement system for the space technology products that have special requirements. The article is devoted to reviewing the positioning systems and development of their classifier, as well as to selecting a displacement actuator. Taking into account special requirements, a displacement system with the electromechanical actuator was selected. After reviewing and analyzing these mechanisms, a backlash-free planetary roller screw mechanism with a flexible nut deformable by the axial forces was chosen. Its further computation and research would be carried out within the frames of the final qualifying work preparation.

### Keywords

Space technology, positioning system, coordinates, accuracy, actuator, roller mechanism, shell, backlash-free mechanism

Received 07.12.2023

© Bauman Moscow State Technical University, 2023

---

### References

- [1] Voyachek A.I. *Osnovy proektirovaniya i konstruirovaniya* [Basics of design and construction]. Penza, PSU Publ., 2008, 228 p. (In Russ.).
- [2] *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. Ed. Timofeev G.A. Moscow, BMSTU Press, 2022, 568 p. (In Russ.).
- [3] Ryakhovskiy O.A. *Detali mashin* [Machine parts]. Moscow, BMSTU Press, 2014, 472 p. (In Russ.).
- [4] Blinov D.S. *Vintovye peredachi lineynykh privodov* [Helical gears for linear actuators]. Moscow, BMSTU Press, 2021, 199 p. (In Russ.).
- [5] Blinov D.S., Morozov M.I. Slippage in screw rolling mechanisms with backlash. *Tribologiya — mashinostroeniye. XIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. posvyashchennaya 100-letiyu so dnya rozhdeniya A.P. Semenova: sb. tr.* [Tribology — mechanical engineering. XIV International Scientific and Technical Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of A.P. Semenov: collection of works] Moscow, IMASH RAN Publ., 2022, pp. 53–56. (In Russ.).
- [6] Aleksashin A.A., Leont'ev S.K., Blinov D.S. et al. Prospects for the introduction of electric drives based on roller screw mechanisms in aviation products. *Tekhnika vozdušnogo flota*, 2023, no. 2 (711), pp. 12–20. (In Russ.).

- [7] Blinov D.S., Egorov O.V., Nosov A.S. The review of the known designs of transmission with no gaps planetary roller-screw mechanism and development of new designs with an integral thin-walled nut. *HANDBOOK. An Engineering journal with appendix*, 2018, no. 12, pp. 17–26. (In Russ.).

**Danshin D.A.** — Master's Program Student, Department of Fundamentals of Machine Design, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Blinov D.S., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Fundamentals of Machine Design, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation. E-mail: dmitriyblinov@mail.ru

**Please cite this article in English as:**

Danshin D.A. Specifics in the positioning systems development for the space technology products. *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal*, 2023, no. 12 (89). (In Russ.).  
<http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-12-958>