

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СФЕРИЧЕСКОГО СКАНЕРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

А. Н. НАУМОВ, С. Ю. ПЕРЕПЕЛКИНА, В. А. ПОДДУБНЫЙ, П. П. КОВАЛЕНКО

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: sker@mail.ifmo.ru

Рассмотрены особенности разработки конструкции сферического сканера для исследования пространственных характеристик антенн с применением технологии прямого привода для двух осей. Спроектировано основание установки сферического сканирования антенн, которое состоит из силового несущего каркаса для размещения элементов конструкции сканера и основания для крепления приемника сигнала. Рассмотрена задача размещения поворотных устройств: угломестного узла для вращения основания закрепленного приемника сигнала в вертикальной плоскости и азимутального узла вращения объекта исследования в горизонтальной плоскости. Выполнены расчеты геометрических характеристик, прочности, жесткости, устойчивости конструкции.

Ключевые слова: *сферический сканер, антенна, прямой привод, безредукторный привод, азимутальный узел, угломестный узел*

Введение. Сферический сканер позволяет автоматизировать процесс измерения напряженности поля в ближней зоне для малогабаритных антенн. Сферическая картина напряженности электромагнитного поля вокруг антенны позволяет определять пространственные, амплитудные, фазовые диаграммы направленности, а также коэффициент усиления остронаправленных и слабонаправленных малогабаритных антенн, а также систем „антенна—обтекатель“. В настоящее время большинство исследований пространственных характеристик антенн проводятся по данным измерений в дальней зоне, что требует больших размеров испытательного полигона. Кроме того, отражение сигнала от поверхности земли негативно сказывается на точности измерений. Результаты измерений характеристик антенн в ближней зоне более точны, чем в дальней зоне.

Основными особенностями аналогичных сканеров являются:

- использование в качестве типового предложения редукторного электропривода, что ограничивает точность позиционирования до $1—3'$;
- отсутствие единой конструкции основания, что усложняет точное расположение антенны относительно приемника сигнала;
- высокая цена.

Исходя из указанных особенностей разработка сферического сканера с безредукторным приводом является актуальной задачей.

Спроектированное устройство обеспечивает более высокую точность позиционирования измерительного устройства по сравнению с зарубежными аналогами, так как позволяет добиться максимальной кинематической точности и полного отсутствия мертвого хода.

Для высокоточного устройства необходимо основание, задающее базу в пространстве и обеспечивающее необходимые технические характеристики. Также необходимы два поворотных устройства, одно из которых будет вращать антенну в горизонтальной плоскости (далее — азимутальный узел), а другое — вращать основание с датчиком в вертикальной плоскости (далее — угломестный узел). Для поворотных устройств используется технология синхронного прямого привода, обеспечивающая лучшие результирующие характеристики,

нежели редукторный привод на основе шаговых двигателей или двигателей постоянного тока. Требуемая точность поворотных устройств 1'.

Разработанная установка для сферического сканирования приведена на рис. 1.

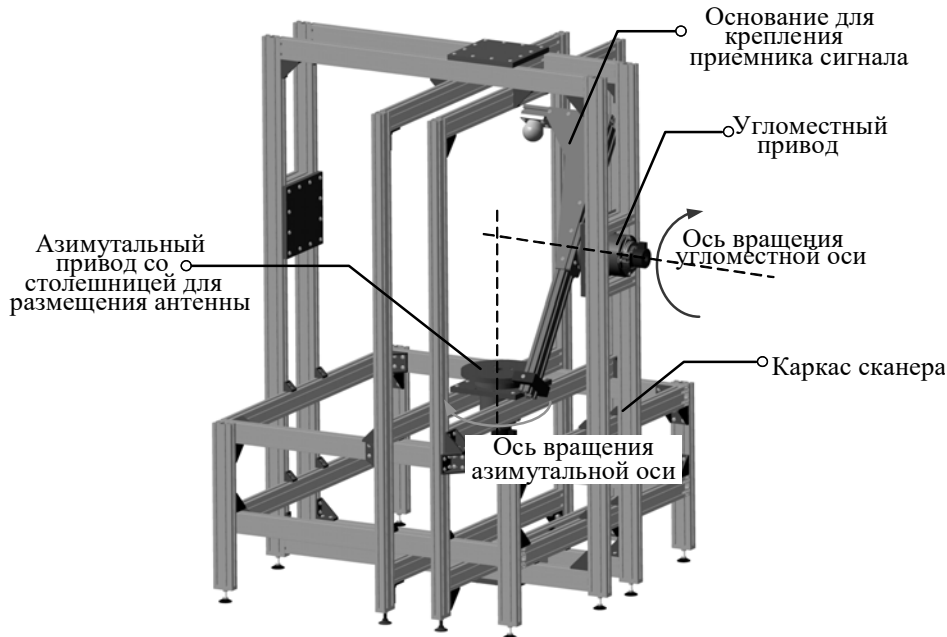


Рис. 1

Разработка конструкции поворотных устройств. Важной составляющей поворотного устройства является подшипниковый узел. В решаемой нами задаче целесообразно использовать высокопрецизионные радиально-упорные подшипники, а также осуществить регулируемый предварительный натяг в них (преднатяг) [1], чтобы убрать осевое биение и получить радиальное и торцевое биение не более 0,005 мм.

На рис. 2 и 3 приведены два поворотных узла: азимутальный для вращения исследуемой антенны в горизонтальной плоскости (1 — столешница, 2 — бобышка, 3 — вал, 4 — малый подшипник, 5 — ротор двигателя, 6 — кронштейн, 7 — датчик, 8 — большой подшипник, 9 — корпус, 10 — большая стопорная гайка, 11 — статор двигателя, 12 — малая стопорная гайка) и угломестный — для вращения приемника сигнала в вертикальной плоскости (1 — отбойники, 2 — подшипники, 3 — большая стопорная гайка, 4 — статор двигателя, 5 — малая стопорная гайка, 6 — пластина-отбойник, 7 — корпус, 8 — вал, 9 — ротор двигателя, 10 — кронштейн, 11 — датчик угла поворота).

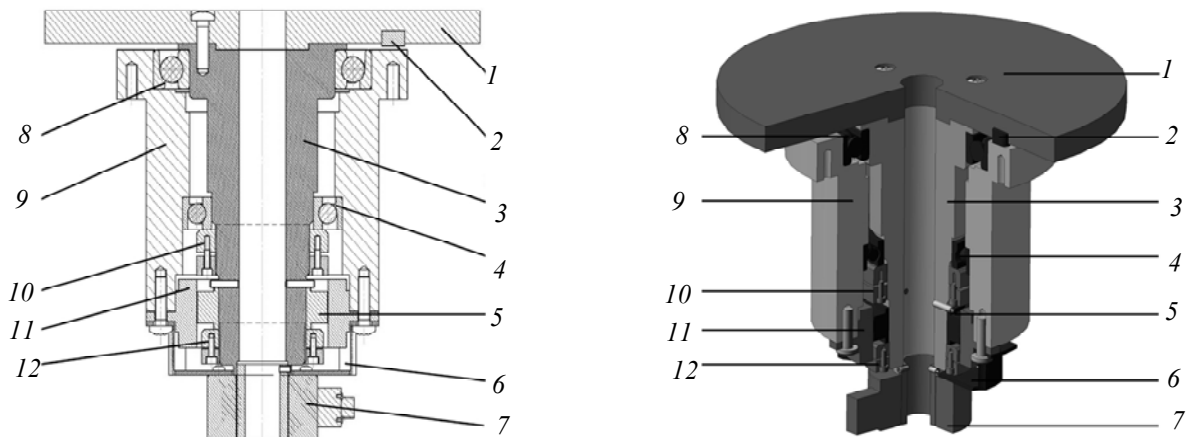


Рис. 2

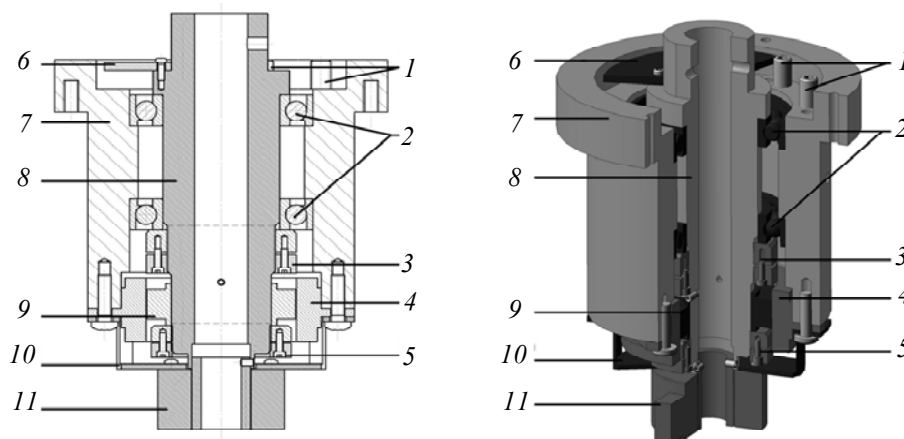


Рис. 3

Для облегчения массы конструкции все детали изготавливаются из алюминиево-магниевого сплава АМг6. Проведенное в среде SolidWorks Simulation моделирование (рис. 4, *a* — результат симуляции кручения вала угломестного узла, *б* — азимутального) показало, что прочности и жесткости данного материала достаточно для обеспечения работоспособности конструкции [2—4]. Валы изготавливаются полыми для подведения кабелей к антенне через отверстие. Поверхности под подшипники, а также поверхности под столешницу обрабатываются с повышенной точностью размеров и форм.

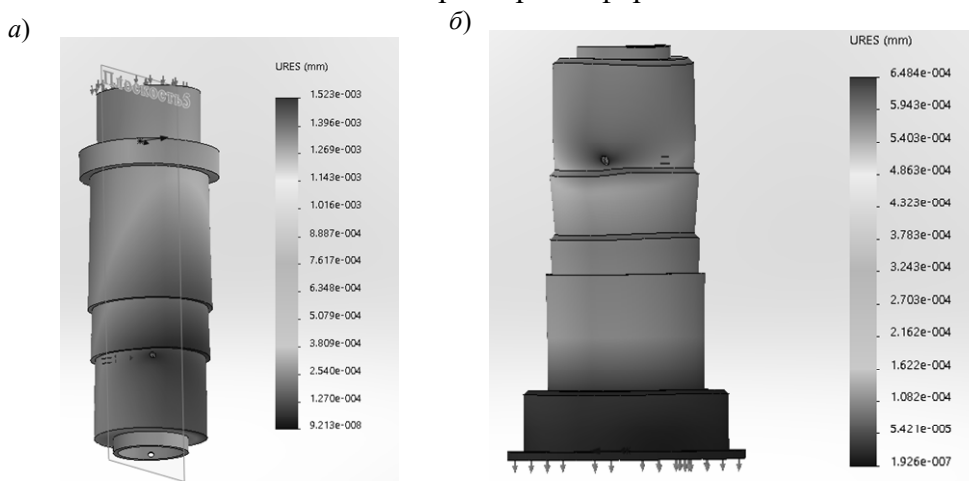


Рис. 4

Полученное значение смещения в миллиметрах переведем в минуты для угломестного узла:

$$\theta = \arctg\left(\frac{1,523 \cdot 10^{-3}}{30}\right) = 0,17',$$

для азимутального узла:

$$\theta = \arctg\left(\frac{6,484 \cdot 10^{-4}}{30}\right) = 0,074'.$$

Полученные значения не превышает допустимых — 0,2'.

Для использования в конструкции были выбраны прецизионные радиально-упорные подшипники [5—7], имеющие два значительных преимущества:

— большой угол контакта (5—25°) уменьшает проскальзывание шариков, благодаря чему возрастает долговечность подшипников;

— гибридный класс точности (Р3 в маркировке) соответствует 4-му классу точности размеров и 2-му классу точности вращения. Данный подшипник дешевле подшипников 2-го класса, но обладает такой же точностью вращения.

Стопорные гайки предназначены для регулируемого преднатяга в подшипниках (большая стопорная гайка) и фиксации ротора двигателя на валу (малая стопорная гайка). К ним предъявляются следующие требования: резьба малой гайки М60; резьба большой гайки М65; конструкция с осевыми стопорными винтами. Выбранные модели стопорных гаек: KMD 12P, KMD 13 удовлетворяют всем требованиям.

Требования к датчику углового положения: высокая разрешающая способность; конструкция с полым ротором. Выбранная модель Лир 276А удовлетворяет всем требованиям, погрешность измерений составляет $\pm 15''$.

Требования к двигателю следующие [8]: конструкция с полым ротором; номинальный момент не менее 2 Н·м для угломестного узла и не менее 1,4 Н·м — для азимутального. Выбранная модель двигателя ДБМ-120-1,6-0,5-3 удовлетворяет всем требованиям.

Разработка конструкции основания. Основание установки сканера состоит из двух частей: основание для крепления приемника сигнала и силовой несущий каркас.

Основание для крепления приемника сигнала, крепящееся к угломестному приводу, представляет собой раму и поддерживает приемник сигнала. По результатам расчетов, угловые ошибки за счет прогибов (отклонение реальной оси приемника сигнала от номинальной) составляют не более $0,95'$. Запас прочности в конструкции составил не менее 11, а запас по выносливости — не менее 5.

Силовой несущий каркас предназначен для размещения всех элементов конструкции сканера (азимутального и угломестного приводов, а также основания для крепления приемника сигнала), располагая ось азимутального привода перпендикулярно оси угломестного привода с отклонением от перпендикулярности, по расчетам, не более $0,4'$ за счет прогибов конструкции. Спроектированное основание дает возможность регулировать расположение узлов, что позволяет избавиться от ошибок вследствие прогибов и технологических неточностей изготовления. Запас прочности в конструкции составил не менее 21.

Суммарное отклонение от перпендикулярности осей азимутального и угломестного приводов составляет не более $0,604'$, что входит в допустимые пределы.

На рис. 5 приведена трехмерная модель основания — силового несущего каркаса.



Рис. 5

Произведены геометрические расчеты, а также расчеты прочности и жесткости основания для крепления приемника сигнала в двух различных положениях и каркаса.

Силовой несущий каркас представляет собой статически неопределимую пространственную раму с большим количеством нагрузок, а потому данная рама была разделена на несколько упрощенных моделей, каждая из которых была рассчитана отдельно. Некоторые эпюры из этих расчетов приведены на рис. 6 (схема устройства основания с консольным креплением приемника сигнала для расчета вертикального положения (слева) и эпюра M^F (справа)) и 7 (эпюра внутреннего момента M^F).

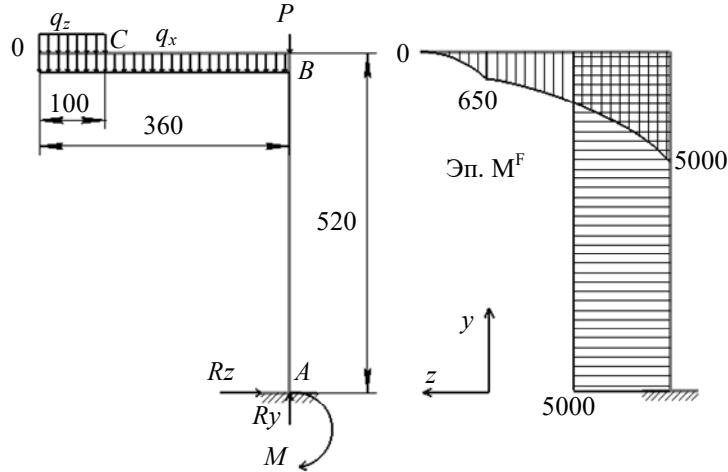


Рис. 6

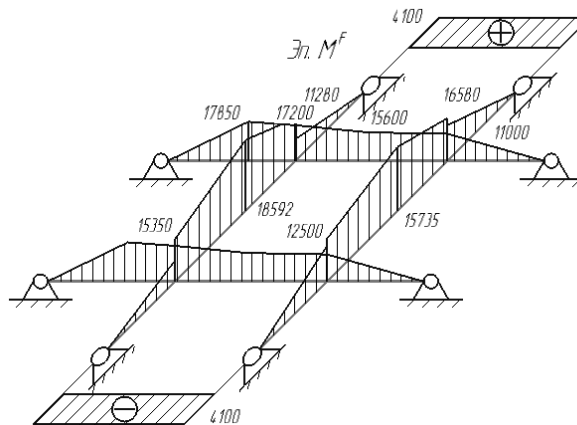


Рис. 7

Также были проведены расчеты прочности и жесткости конструкции методом конечных элементов в SolidWorks Simulations, распределение линейных прогибов несущего каркаса по оси X иллюстрирует рис. 8.

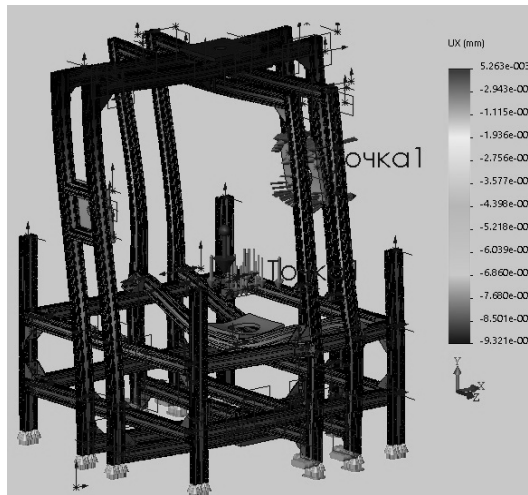


Рис. 8

Расчеты на прочность, устойчивость, выносливость и расчеты винтовых соединений проводились для определения работоспособности конструкции под нагрузками, которые будут действовать в процессе эксплуатации установки. Нагрузки в расчетах несколько превышали реальные нагрузки в конструкции. Расчеты жесткости, а также расчеты углов поворотов различных частей конструкции проводились с целью определения соответствия точности конструкции требованиям технического задания. Расчеты геометрии конструкции проводились для определения общей работоспособности, так как столкновение движущихся частей в процессе эксплуатации недопустимо и приводит к поломке установки.

Заключение. Разработана двухприводная система установки сферического сканирования пространственных характеристик антенн гипервысокочастотного диапазона, состоящая из:

— опорно-поворотного механизма, обеспечивающего вращение объекта исследования (антенны) в горизонтальной плоскости (азимутальный узел);

— поворотного механизма, обеспечивающего вращение основания для крепления приемника сигнала с измерительным зондом в вертикальной плоскости (угломестный узел).

Основание состоит из двух независимых частей:

— основание для крепления приемника сигнала (представляет собой раму), прикрепляемое к угломестному поворотному устройству, поддерживает приемник сигнала;

— силовой несущий каркас для размещения элементов конструкции сканера, предназначенный для расположения в пространстве двух поворотных устройств и измерительной аппаратуры (оси поворотных устройств располагаются перпендикулярно друг другу с погрешностью не более 1').

Разработанная конструкция обладает следующими особенностями:

— подшипники выдерживают нагрузку 13 кг на угломестном узле и в 50 кг — на узле азимутальном с большим коэффициентом запаса прочности;

— предусмотрены отверстия для прокладки кабелей через поворотные узлы, для чего использован датчик с полым ротором, а валы изготовлены с осевым отверстием;

— конструкция подшипникового узла позволяет регулировать преднатяг в подшипниках посредством стопорной гайки;

— спроектированное основание позволяет регулировать расположение поворотных устройств для предотвращения ошибок вследствие прогибов и технологических неточностей изготовления;

— расчетные погрешности за счет жесткости конструкции не выходят за допустимые пределы.

Результаты расчетов и моделирования поворотных узлов показали, что кручение валов не выходило за допустимые пределы.

Основание для крепления приемника сигнала позволяет учесть угловые ошибки размещения приемника сигнала за счет прогибов (отклонению реальной оси приемника сигнала от номинальной) не более 0,95'.

Силовой несущий каркас для размещения элементов конструкции сканера располагает оси азимутального и угломестного узлов с расчетной погрешностью не более 0,604'. Запас прочности в конструкции составил не менее 21, а расчетные максимальные угловые ошибки, помимо неперпендикулярности осей, не более 0,054'.

Дальнейшая работа над проектом заключается в испытаниях и юстировке разработанного сканера.

Настоящий проект выполнен при поддержке НИОКР 417015 „Автоматизированный сферический сканер для исследования пространственных характеристик антенн“, где и были апробированы полученные результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анухин В. И. Допуски и посадки. Выбор, расчет и указание на чертежах: учеб. пособие. СПб: Питер, 2012. 256 с.
2. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. М.: ДМК Пресс, 2015. 562 с.
3. Александров А. В., Потапов В. Д., Державин Б. П. Сопротивление материалов: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 2003. 560 с.
4. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов: учеб. для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.
5. Брицкий В. Д., Рыбаков В. И. Разъемные соединения деталей и приборов: учеб. пособие. Л.: ЛИТМО, 1991. 74 с.
6. Галахов М. А., Бурмистров А. Н. Расчет подшипниковых узлов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
7. Черменский О. Н., Федотов Н. Н. Подшипники качения. Справочник-каталог. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
8. Справочник конструктора точного приборостроения / Под ред. Ф. Л. Литвина. М.—Л.: Машиностроение, 1964. 944 с.

Сведения об авторах

- Алексей Николаевич Наумов** — студент; Университет ИТМО, факультет факультет систем управления и робототехники; E-mail: nan.work@yandex.ru
- Светлана Юрьевна Перепелкина** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет факультет систем управления и робототехники; E-mail: sker@mail.ifmo.ru
- Владислав Алексеевич Поддубный** — студент; Университет ИТМО, факультет факультет систем управления и робототехники; E-mail: poddubnyvlad@yandex.ru
- Павел Павлович Коваленко** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет факультет систем управления и робототехники; E-mail: kovalenko_p.p@mail.ru

Поступила в редакцию
03.02.2020 г.

Ссылка для цитирования: Наумов А. Н., Перепелкина С. Ю., Поддубный В. А., Коваленко П. П. Проектирование сферического сканера для исследования пространственных характеристик антенн в ближней зоне // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 4. С. 359—366.

DESIGNING A SPHERICAL SCANNER TO STUDY THE SPATIAL CHARACTERISTICS OF ANTENNAS IN THE NEAR ZONE

A. N. Naumov, S. Yu. Perepelkina, V. A. Poddubny, P. P. Kovalenko

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: sker@mail.ifmo.ru

Special features of a spherical near-field antenna scanner design for studying spatial characteristics of antennas using the direct-drive approach for both axes of rotation are considered. The designed base of the spherical antenna scanning installation consists of a power bearing frame for placing the scanner design elements, and a base for mounting the signal receiver. The problem of placement of rotary devices is discussed; the devices include the angular node for rotation of the base of the fixed signal receiver in the vertical plane and the azimuth node for rotation of the object of study in the horizontal plane. Calculations of geometric characteristics, strength, rigidity, and stability of the structure are performed.

Keywords: spherical scanner, antenna, direct drive, gearless drive, elevated axis bearing unit, azimuth bearing unit

REFERENCES

1. Anukhin V.I. *Dopuski i posadki. Vybór, raschet i ukazaniye na chertezhakh* (Tolerances and Landings. Selection, Calculation and Indication on the Drawings), St. Petersburg, 2012, 256 p. (in Russ.)
2. Alyamovskiy A.A. *SolidWorks Simulation. Inzhenernyy analiz dlya professionalov: zadachi, metody, rekomendatsii* (SolidWorks Simulation. Engineering Analysis for Professionals: Tasks, Methods,

- Recommendations), Moscow, 2015, 562 p. (in Russ.)
3. Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. *Soprotivleniye materialov* (Strength of Materials), Moscow, 2003, 560 p. (in Russ.)
 4. Feodos'yev V.I. *Soprotivleniye materialov* (Strength of Materials), Moscow, 1999, 592 p. (in Russ.)
 5. Britskiy V.D., Rybakov V.I. *Raz"yemnyye soyedineniya detaley i priborov* (Plug Connections of Parts and Devices), Leningrad, 1991, 74 p. (in Russ.)
 6. Galakhov M.A., Burmistrov A.N. *Raschet podshipnikovyx uzlov* (Calculation of Bearing Units), Moscow, 1988, 272 p.
 7. Chermenskiy O.N., Fedotov N.N. *Podshipniki kacheniya. Spravochnik-katalog* (Rolling Bearings. Directory Directory), Moscow, 2003, 576 p. (in Russ.)
 8. Litvin F.L., ed., *Spravochnik konstruktora tochnogo priborostroyeniya* (Handbook of Precision Instrumentation Designer), Moscow–Leningrad, 1964, 944 p. (in Russ.)

Data on authors

- Alexey N. Naumov** — Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics;
E-mail: nan.work@yandex.ru
- Svetlana Yu. Perepelkina** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics;
E-mail: sker@mail.ifmo.ru
- Vladislav A. Poddubny** — Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics;
E-mail: poddubnyvlad@yandex.ru
- Pavel P. Kovalenko** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics;
E-mail: kovalenko_p.p@mail.ru

For citation: Naumov A. N., Perepelkina S. Yu., Poddubny V. A., Kovalenko P. P. Designing a spherical scanner to study the spatial characteristics of antennas in the near zone. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 4. P. 359—366 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-4-359-366