

## ВЫБОР МАТЕРИАЛА ВИБРАТОРОВ АНТЕННЫ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ИОНОЗОНДА

А.Б. Захаренко, А.Ю. Федотов, И.И. Морозов, Д.О. Чуянов

*Исследованы конструктивные исполнения вибраторной передающей антенны на предмет эффективности сканирования ионосферы с целью получения ионограммы. Имитационное моделирование проводилось методом конечных элементов с использованием программного модуля Ansys HFSS. При расчётах было учтено, что трубчатые плечи выполнены из углепластика, при этом плечо длиной 15 м имеет сопротивление по постоянному току около 100 Ом; углепластиковая трубка, металлizedированная палладием, имеет сопротивление по постоянному току около 16 Ом. В результате проведённого анализа установлено, что все рассмотренные конструктивные исполнения антенн имеют схожие диаграммы направленности. Анализируя полученные результаты по критерию, характеризующему излучаемую мощность в диапазоне частот 3 – 20 МГц, следует признать наилучшими: антенну с трубчатыми углепластиковыми плечами, металлizedированными палладием и антенну с трубчатыми углепластиковыми плечами, металлizedированную палладием, со стальной лентой внутри. На втором месте находится антенна с трубчатыми углепластиковыми плечами и стальной лентой внутри.*

**Ключевые слова:** вибраторная передающая антенна, диаграмма направленности, КПД, КСВн.

Распространение радиоволн существенно зависит от концентрации заряженных частиц в различных слоях ионосферы – слоя атмосферы Земли, ионизированного вследствие облучения космическими лучами. Ионограмма (высотнo-частотная характеристика) – один из самых распространённых источников информации об ионосфере, представляющий собой набор точек, каждая из которых имеет координаты: частоту и действующую высоту. Ионограммы регистрируют следы отражений высокочастотных импульсных радиосигналов, генерируемых ионозондами. Передатчик ионозонда излучает радиоволны от низких к высоким частотам. Приёмник ионозонда регистрирует отражённый сигнал от различных слоёв ионосферы. Эти отражённые сигналы формируют характерные «следы», которые и составляют ионограмму. Для снятия ионограмм применяются наземные и космические ионозонды.

В настоящее время для исследования ионосферы Земли разрабатывается КА «Ионосфера», основной целевой аппаратурой которого является космический ионозонд «ЛАЗРТ», в состав которого входит вибраторная передающая антенна [1], основные размеры которой показаны на рис. 1 и 2, а также вибраторная приёмная антенна [1]. Для обеспечения работоспособности ионозонда в диапазоне частот 0,1 – 20 МГц плечи (вibrаторы) передающей антенны должны иметь длину около 15 м. Для минимизации места, занимаемого КА под обтекателем ракеты-носителя, обе антенны выполнены на основе трубчатых конических углепластиковых телескопических секций, выдвигающихся на расчётной орбите.

Углепластик, выбранный в качестве материала, обеспечивает механическую прочность и электрическую проводимость трубчатой антенны. При размерах углепластикового плеча антенны, согласно рис. 2, его электрическое сопротивление на постоянном токе велико и составляет около 100 Ом. Для уменьшения электрического сопротивления предлагается проанализировать стойкое к механическому истиранию, инертное к химической реакции окисления, а также стойкое к космическим излучениям, технологичное и недорогое покрытие, которое значительно снизит сопротивление плеча антенны. Вышеописанными свойствами обладает, например, покрытие палладием. В случае применения этого покрытия сопротивление плеча антенны на постоянном токе уменьшается до 16 Ом.

Механизм выдвижения плеча вибраторной передающей антенны, защищённый патентом [2] и показанный на рис. 3, работает следующим образом. Электропривод 1 вращает колесо 2 с намотанной на нём лентой-толкателем 3, который выдвигает комплект телескопических секций 4. После выдвижения плеч антенна приобретает вид, показанный на рис. 1. При этом, в режиме сканирования напряжение может подаваться: на телескопические секции 4, а также на телескопические секции 4 и на ленту 3.

В статье рассматриваются различные материалы для создания вибраторной передающей антенны, которая обеспечивала бы эффективность сканирования ионосферы с целью получения ионограммы.

Путём имитационного моделирования для различных конструктивных исполнений антенны по-

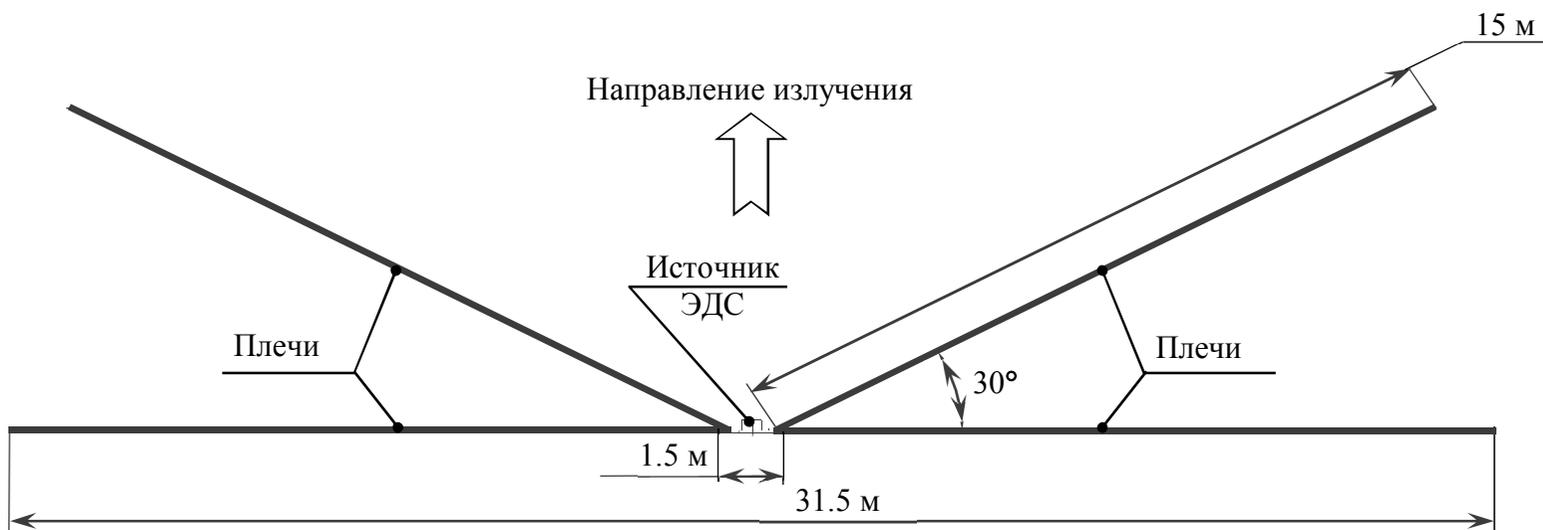


Рис. 1. Схема вибраторной передающей антенны

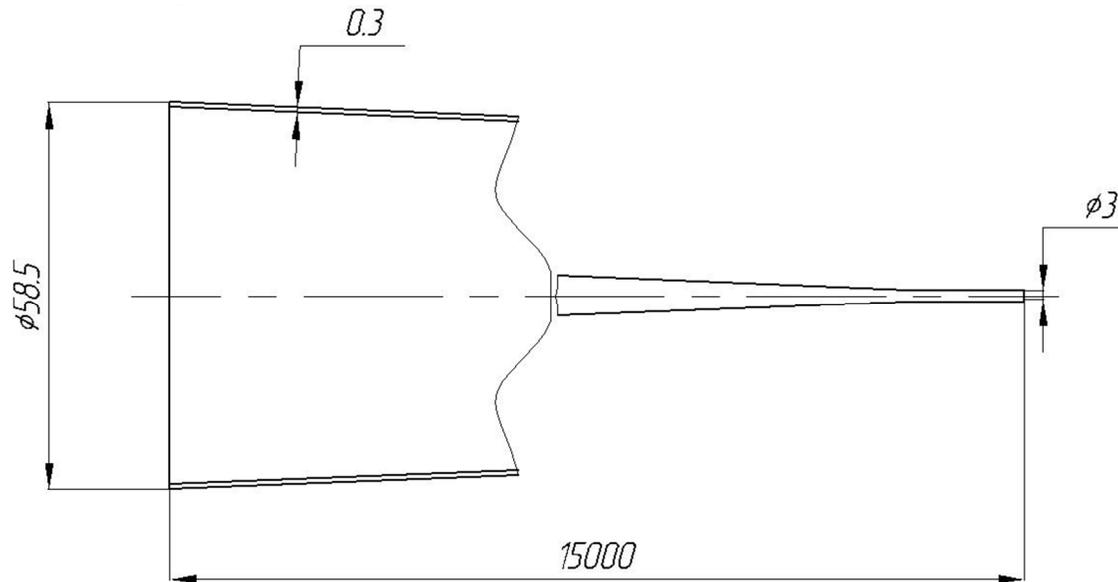
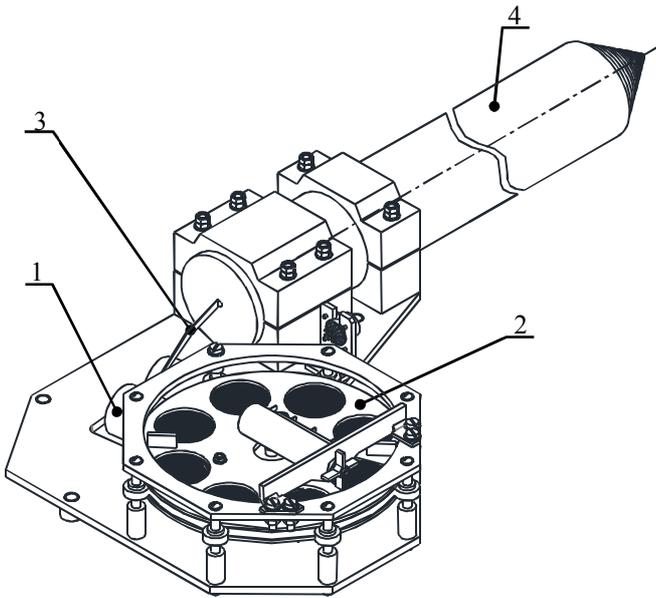


Рис. 2. Размеры плеча вибраторной передающей антенны



**Рис. 3. Общий вид механизма выдвижения плеча вибраторной передающей антенны**

лучим зависимости коэффициента полезного действия (КПД) и коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВн) от частоты при питании от источника ЭДС с входным сопротивлением 200 Ом.

Конструктивные исполнения антенны следующие:

- трубчатые углепластиковые плечи, металлизированные палладием (напряжение подаётся на телескопические секции);
- трубчатые углепластиковые плечи (напряжение подаётся на телескопические секции);
- трубчатые углепластиковые плечи со стальной лентой внутри (напряжение подаётся на телескопические секции и на ленту);
- трубчатые углепластиковые плечи, металлизированные палладием, со стальной лентой внутри (напряжение подаётся на телескопические секции и на ленту).

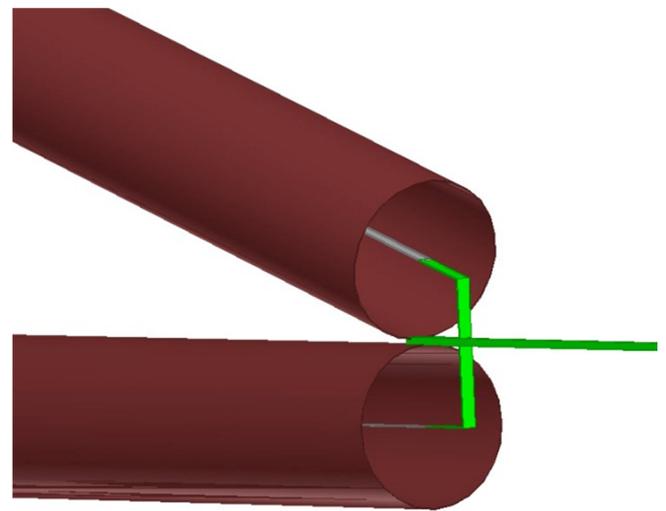
Имитационное моделирование проводилось методом конечных элементов с использованием программного модуля Ansys HFSS [3]. При расчётах было учтено, что:

- трубчатые плечи выполнены из углепластика, при этом плечо длиной 15 м имеет сопротивление по постоянному току около 100 Ом;

– углепластиковая трубка, металлизированная палладием, имеет сопротивление по постоянному току около 16 Ом.

Расчётная 3D-модель определена сеткой, состоящей из 112 тысяч конечных элементов. Для упрощения расчётов при моделировании лента-толкатель принята в форме параллелепипеда, проходящего по оси трубки (рис. 4). В реальности лента-толкатель после выдвижения плеча теряет устойчивость и хаотично располагается внутри трубки.

Свойства материалов заданы так, чтобы электрические сопротивления соответствовали вышеуказанным значениям.



**Рис. 4. Схема расположения ленты внутри трубчатых секций в расчётной модели**

В результате моделирования получены следующие результаты. Диаграммы направленности всех четырёх вариантов антенн на соответствующих частотах практически одинаковы и удовлетворяют предъявленным требованиям. В качестве примера на рис. 5 и 6 приведены диаграммы направленности в поперечном сечении и в 3D с трубчатыми плечами из углепластика на частотах 5 и 15 МГц.

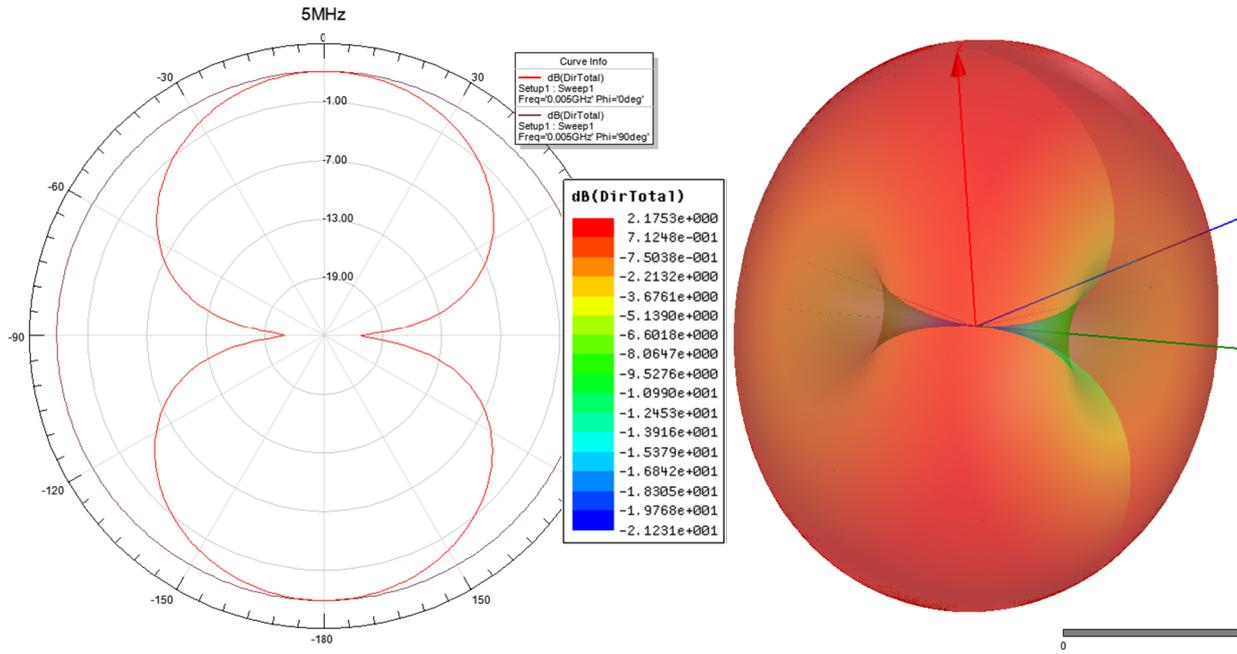


Рис. 5. Диаграмма направленности антенны в поперечном сечении и в 3D на частоте 5 МГц

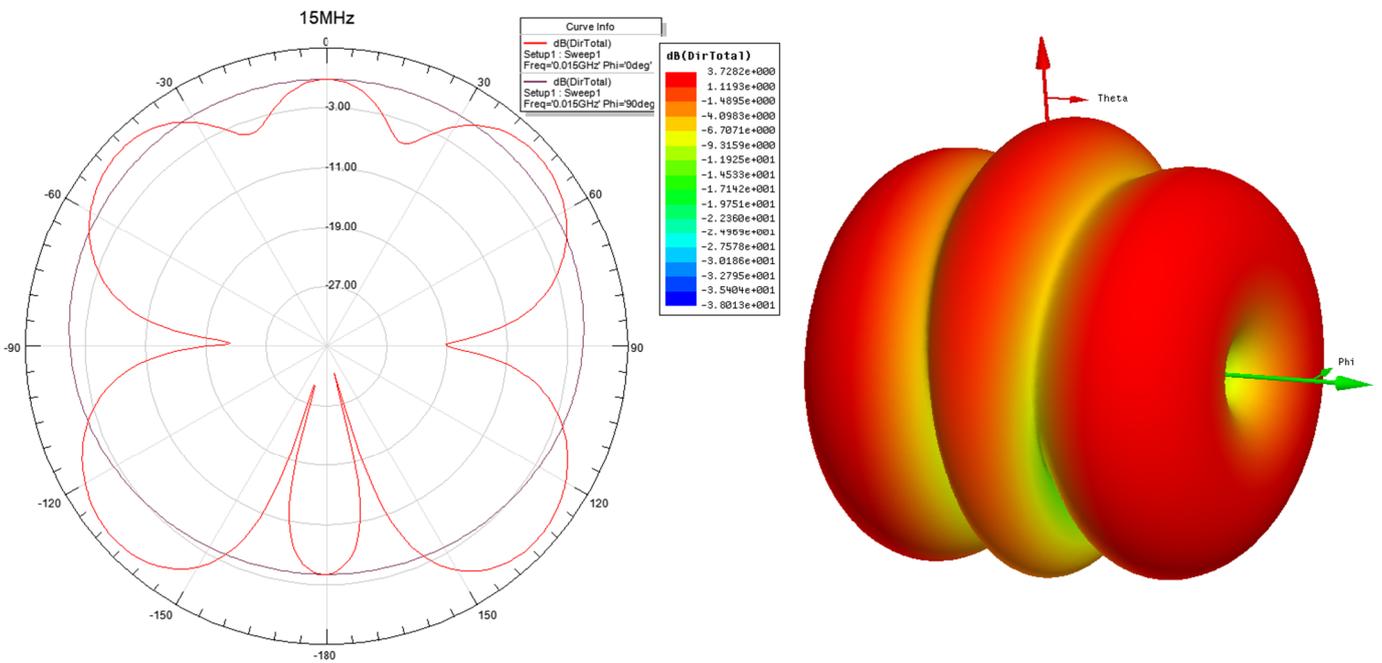


Рис. 6. Диаграмма направленности антенны в поперечном сечении и в 3D на частоте 15 МГц

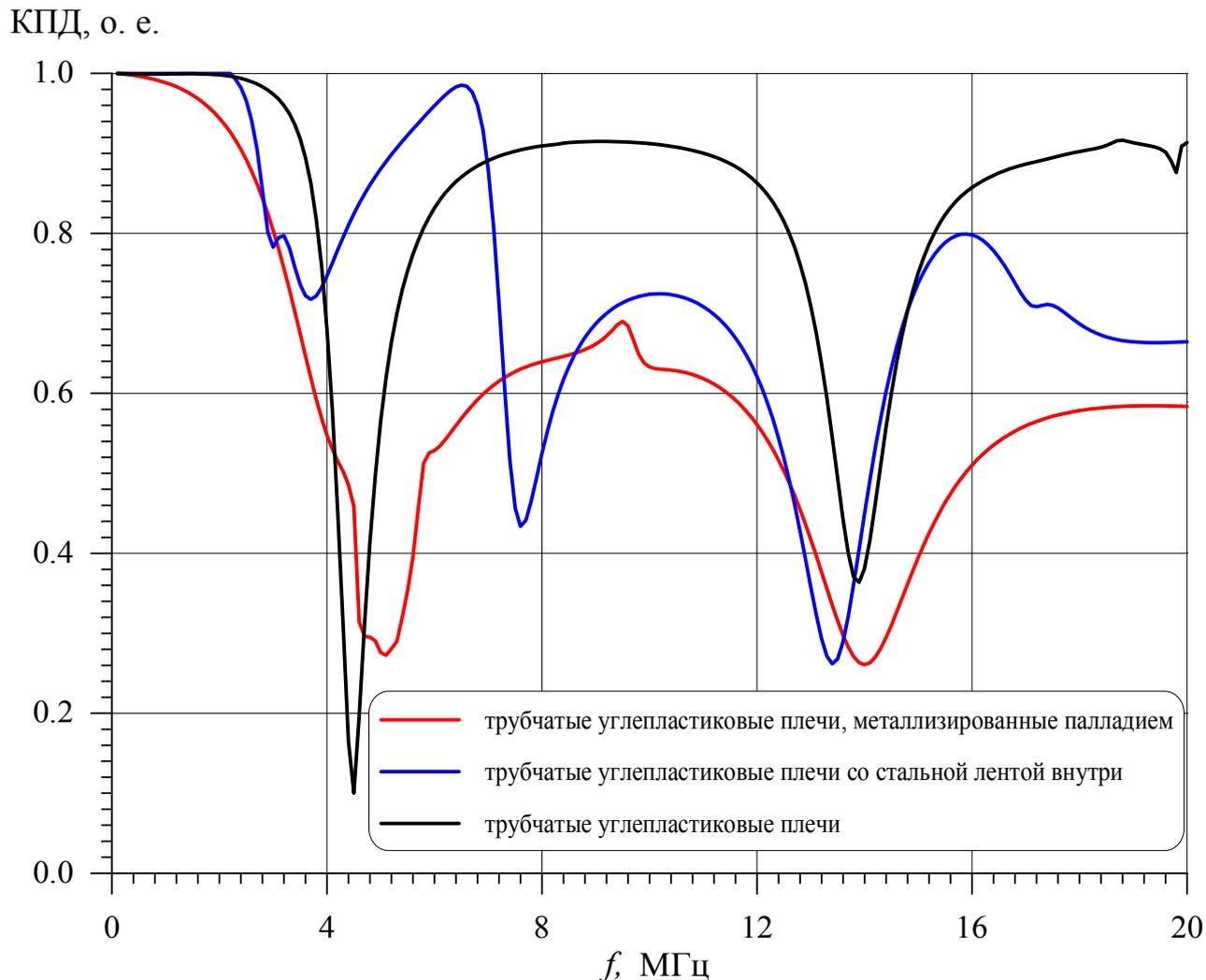


Рис. 7. КПД конструктивных исполнений передающей антенны

Зависимости КПД от частоты для первых трёх вариантов вибраторной антенны представлены на рис. 7. График четвертого варианта антенны практически совпадает с первым.

Следует отметить, что излучаемая антенной мощность определяется не только КПД, но и КСВн антенны, работающей на нагрузку 200 Ом.

Зависимости КСВн от частоты для первых трёх конструктивных исполнений антенны представлены на рис. 8.

График четвертого варианта антенны практически совпадает с первым. При КСВн более 10 антенна излучает не более 31% мощности, 69% мощности остаётся в передатчике, что ведёт к его перегреву. Таким образом, в диапазоне частот 0,1 – 3 МГц все варианты антенн излучают незначительную мощность. В диапазоне частот 3 – 20 МГц наименьший КСВн имеет антенна с трубочатыми углепластиковыми плечами, металлизированными палладием.

КСВн, о. е.

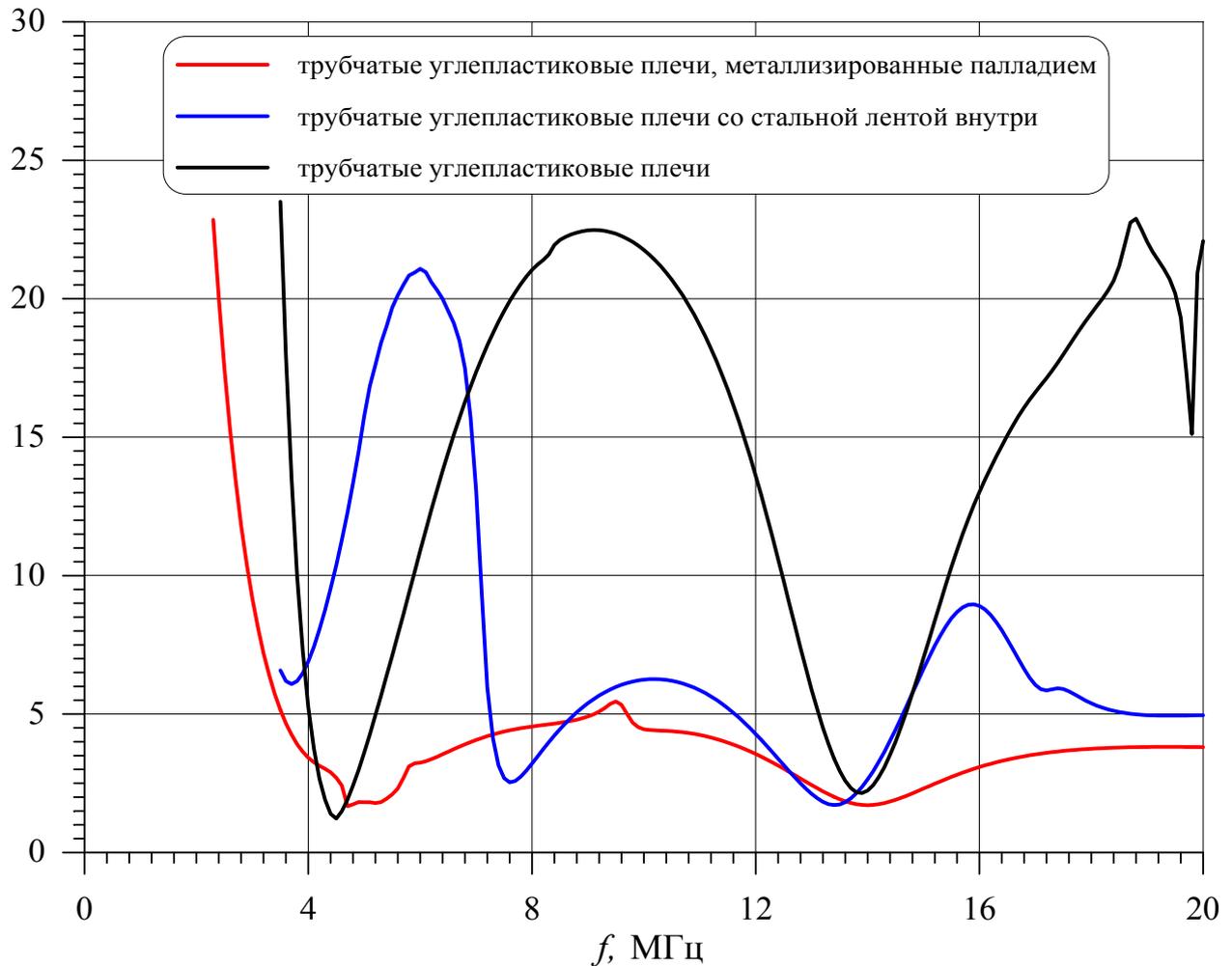


Рис. 8. КСВн конструктивных исполнений передающей антенны

### Выводы

1. Проведено имитационное моделирование ряда конструктивных исполнений вибраторной передающей антенны, построенной на основе трубчатых телескопических секций.

2. Анализируя полученные результаты по критерию, характеризующему излучаемую мощность в диапазоне частот 3 – 20 МГц, следует признать наилучшими: антенну с трубчатыми углепластиковыми плечами, металлизированными палладием и антенну с трубчатыми углепластиковыми плечами, металлизированными палладием, со стальной лентой внутри. На втором месте находится антенна с трубчатыми углепластиковыми плечами и стальной лентой внутри.

### Литература

1. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн: Учебник для вузов / Ерохин Г. А., Чернышёв О. В., Козырев Н. Д., Кочержевский В. Г. / под. ред. Г. А. Ерохина. – 3-е изд. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2007. – 491 с.
2. Телескопическая антенна космического аппарата (варианты): патент на полезную модель РФ № 148185 по заявке № 2014131643 / Авторы: Геча В. Я., Захаренко А. Б., Федотов А. Ю. и др. Патентообладатель: АО «Корпорация «ВНИИЭМ». МПК H01Q1/10. – Оpubл. 27.11.2014. – Бюллетень № 33. – 3 с.
3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cadfem-cis.ru/products/ansys/electronics/hfss/>.

Поступила в редакцию 21.10.2016

*Андрей Борисович Захаренко*, д-р техн. наук,  
начальник отдела,  
т. (495) 366-26-44, e-mail: vniiem@vniiem.ru.  
*Александр Юрьевич Федотов*, д-р техн. наук, начальник лаборатории,  
т. (495) 366-27-55, e-mail: vniiem@vniiem.ru.  
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

*Илья Игоревич Морозов*, директор филиала ЗАО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс»  
в Приволжском федеральном округе (ПФО),  
т. (846) 279-49-71, (927) 001-00-34, e-mail: Ilya.morozov@cadfem-cis.ru.  
*Дмитрий Олегович Чуянов*, ведущий инженер по технической поддержке  
ANSYS Electronics Solution,  
ЗАО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс» в ПФО,  
т. (960) 847-00-77, e-mail: Dmitriy.chuyanov@cadfem-cis.ru.

## SELECTING THE MATERIAL INTENDED FOR THE ANTENNA VIBRATOR OF THE SPACE IONOSPHERE

**A.B. Zakharenko, A.Iu. Fedotov, I.I. Morozov, D.O. Chuianov**

Structural design of the vibrator transmission antenna has been analyzed in order to evaluate its effectiveness in the process of ionosphere scanning intended for ionogram reception. Simulation modeling has been performed by using the finite-element method with the Ansys HFSS software unit. The fact that the tube arms were manufactured from carbon fiber, has also been taken into account in the calculations, in addition to the fact that the arm is 15 meters long and has a DC resistance of 100 Ohm; carbon fiber tube metalized by palladium has the DC resistance of 16 Ohm. The analysis results indicated that all the revised antenna structural designs have the similar directional pattern. Based on the analysis results obtained using the criteria of radiated power within the frequency band of 3 – 20 MHz – the best devices are: antenna with tube carbon fiber arms metalized by palladium as well as the antenna with tube carbon fiber arms metalized by palladium with a steel tape inside.

**Key words:** vibrator transmission antenna, directional diagram, efficiency, voltage standing-wave ratio.

### References

1. Antenna-feeder devices and the distribution of radio-waves: College textbook / Erokhin G. A., Chernyshev O. V., Kozyrev N. D., Kocherzhevskii V. G. / edited by G. A. Erokhin. – 3<sup>rd</sup> edition. – M. : Hot Line – Telecom, 2007. – 491 p.
2. Spacecraft telescopic antenna (options): patent right on the utility model from the Russian Federation No. 148185 by request No. 2014131643 / Authors: Gecha V. Ia., Zakharenko A. B., Fedotov A. Iu. and others. Patentee: JC 'VNIIEМ Corporation'. IPC H01Q1/10. – Published on November 27, 2014. – Bulletin No. 33 – 3 p.
3. [Digital resource]. – Access mode: <http://www.cadfem-cis.ru/products/ansys/electronics/hfss/>.

*Andrei Borisovich Zakharenko*, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Head of Department,  
tel. (495) 366-26-44, e-mail: vniiem@vniiem.ru.

*Aleksandr Iurevich Fedotov*, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Head of Laboratory,  
tel. (495) 366-27-55, e-mail: vniiem@vniiem.ru.  
(JC 'VNIIEМ Corporation').

*Ilya Igorevich Morozov*, Branch Director of 'CADFEM CIS'JSC  
of Volga Federal District,  
tel. (846) 279-49-71, (927) 001-00-34, e-mail: Ilya.morozov@cadfem-cis.ru.

*Dmitrii Olegovich Chuianov*, Leading Engineer of Technical Support  
ANSYS Electronics Solution, 'CADFEM CIS'JSC of Volga Federal District,  
tel. (960) 847-00-77, e-mail: Dmitriy.chuyanov@cadfem-cis.ru.