



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.7.11>

УДК: 621.396.67.012.12

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЯДА НЕИСПРАВНОСТЕЙ РУПОРНОЙ АНТЕННЫ, ВОЗМОЖНЫХ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВИАЦИОННЫХ БОРТОВЫХ РАДИОЛОКАТОРОВ

А.М. Матвеев, М.К. Золотенкова, Н.А. Боцкалев

**Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4**

Статья поступила в редакцию 2 мая 2025 г.

Аннотация. Данная статья посвящена вопросам моделирования ряда возможных неисправностей антенн, которые могут возникать в процессе полета авиационного носителя РЛС. В качестве примера антенны рассматривалась модель волноводного рупора. Приведены результаты моделирования ряда конструктивных механических дефектов антенны и диаграмм направленности с расчетом на применение при проектировании системы автоматизированного контроля технического состояния и диагностики антенн в условиях летной эксплуатации авиационных радиолокационных систем.

Ключевые слова: антенны, система контроля, диаграмма направленности, БРЛС.

Автор для переписки: Золотенкова Мария Константиновна,

zolotenkovamk@mai.ru

Введение

Как известно, для повышения надежности систем авиационных РЛС еще на этапах разработки конструируется система контроля, с помощью

которой определяется текущее состояние того или иного блока в процессе эксплуатации и технического обслуживания. В случае выявления неисправности система может переключаться на резервные блоки, выполнять операции по восстановлению работоспособности, либо, как минимум, информировать оператора о факте неисправности. Данные системы называются системами контроля технического состояния объекта. При современном развитии БРЛС (источник [1]) отдельное место занимает и развитие систем автоматизированного контроля и диагностики.

При проектировании системы автоматизированного контроля и диагностики радара, и его антенны, как составной части, необходимо определиться с возможными (типовыми или наиболее вероятными) неисправностями, чтобы как можно более эффективно продумать способы их обнаружения разрабатываемыми контрольными операциями. Данная статья посвящена вопросам моделирования ряда возможных неисправностей антенн, которые могут возникать в процессе полета авиационного носителя РЛС. Моделирование заключалось в проектировании антенны в программной среде SolidWorks 2020 с перенесением конструкции в программу CST Studio 2021, задания ряда свойств перенесенной конструкции (указание материалов конструкции, расстановки датчиков поля) и вывода результатов моделирования в дальней зоне диаграмм направленности. Рассматриваемые конструктивные нарушения сначала моделировались в SolidWorks, а затем вместе с конструкцией антенны загружались в CST Studio. В статье представлены результаты моделирования диаграмм направленности касательно только телесных углов участка задней полусферы по соображениям способа контроля, не создающего потенциально помех работе антенны РЛС в рабочем секторе углов сканирования в условиях полета носителя.

1. Анализ проблематики контроля бортовой антенны в условиях полета

При проектировании архитектуры системы контроля как набора контрольных операций (сквозных тестов трактов, сравнения признаков,

мониторинга показаний датчиков и пр.) важным параметром является полнота контроля, непосредственно влияющая на методическую достоверность ошибки результатов. В части полноты контроля РЛС в летных условиях отсутствия измерительного стенда снятия диаграмм направленности полноценный достоверный контроль антенны радара имеет очевидные затруднения. Если структуры приемника, передатчика и фидерного тракта во многом включают в себя датчики систем функционального или тестового контроля (детекторы проходящей мощности, детекторы шума и др.), то непосредственно антенна в своей рабочей зоне ДНА датчиками снятия амплитудно-фазового распределения или электромагнитного поля как правило не снабжена по ряду причин, в том числе, необходимости обеспечить неискаженную двумерную ДНА. Это приводит к тому, что мы не можем зачастую знать наверняка, исправна сама антенна или нет. Существуют работы, в которых в зоне боковых лепестков или на границе рабочего сектора обзора на выносных кронштейнах предлагается закреплять измерительные датчики (амплифазометры, антенны), что несет конструктивные неудобства, не всегда оправдано или возможно при различных вариантах установки радара на носителе (увеличение и нарушение оптимальной формы радиопрозрачного обтекателя), может ухудшить летные характеристики, а также вследствие вибрационных и ударных нагрузок не позволяет рассчитывать на приемлемую точность оценки. Известны способы контроля антенны РЛС по искусственной фоно-целевой обстановки радиополигона, который проводится по точечным отражателям как правило пассивного типа, расположенным на земле в известных летчику координатах, что означает необходимость пролета над определенной территорией, что не всегда удобно и возможно. С данным методом можно ознакомиться в источнике [2].

В данной работе предлагается другой способ функционального контроля, основанный на оценке структуры диаграммы направленности антенны РЛС в нерабочей зоне, например, в зоне задней полусферы при переднебоковом обзоре радара за счет установки измерительных антенн в непосредственной близости за антенной. При этом оценка характеристик поля контролируемой

антенны производится в ближней зоне, что было рассмотрено, в частности, в работах [3] и [4].

Как известно, ДН антенны однозначно связана с амплитудно-фазовым распределением токов на поверхности антенны через преобразование Фурье. Таким образом, любое изменение структуры данного распределения ввиду механических повреждений и деформаций антенны приводит к трансформациям в ДН антенны как основного луча, так и боковых лепестков согласно источнику [5].

Но стоит отметить, что для создания алгоритмов контролепригодности антенны необходимо иметь выборку вариаций диаграмм направленности антенны не только в целом состоянии, но и с механическими повреждениями. Для данной задачи наиболее подходящим является метод моделирования, который в свою очередь может показать нам в довольно близком приближении последствия тех или иных механических повреждений.

2. Моделирование ряда антенн с механическими нарушениями

В качестве исследуемого типа антенны была выбрана рупорная антенна как достаточно широкополосная и простая в моделировании. Выбор факторов повреждения антенны производился на основе наиболее вероятных в случае авиационного применения. Были выбраны следующие факторы:

- 1) Рупор с изгибом стенки;
- 2) Рупор с вмятиной в стенке;
- 3) Рупор с царапиной;
- 4) Рупор с основанием, засоренным мокрым песком;
- 5) Рупор с основанием, засоренным сухим песком;
- 6) Рупор с нарушением сварного шва волновода;
- 7) Рупор с нарушением сварного шва на стыке волновода с раскрывом;
- 8) Рупор с нарушением сварного шва раскрыва рупора.

Данные факторы интересны тем, что могут отражать как неисправности, вызванные нарушением технологических процессов при изготовлении антенны,

так и полученные в результате эксплуатации, в частности, в случае попадания в зону установки РЛС поражающих элементов противовоздушных ракет. В соответствии с выбранными факторами было проведено моделирование в среде CST Microwave Studio как самого рупора (и его ДН), так и рупора с различными повреждениями и произведено сравнение полученных при этом диаграмм направленностей с акцентом на заднюю полусферу. Частота моделированной антенны – 7 ГГц, материал – PEC.

На рисунках 1 и 2 представлена диаграмма направленности смоделированной рупорной антенны без внесения дефектов в двух проекциях. Результаты моделирования антенн с дефектами приведены на рисунках 3-25, (представлены как модель антенны, так и диаграмма направленности).

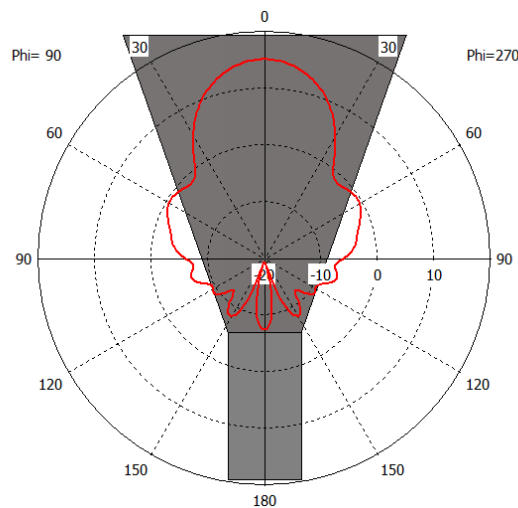


Рис. 1. ДН антенны в 1 проекции.

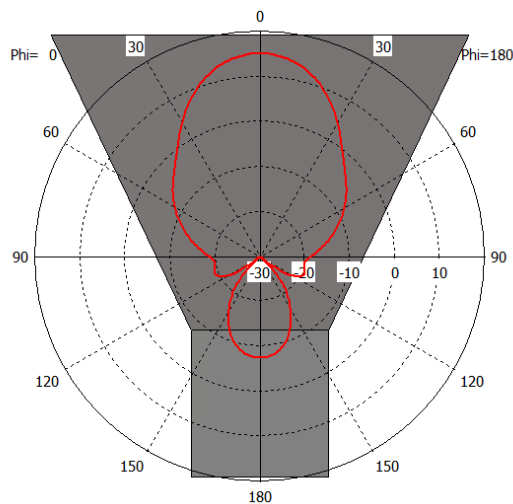


Рис. 2. ДН антенны во 2 проекции.

2.1 Моделирование рупора с изгибами стенки и вмятиной

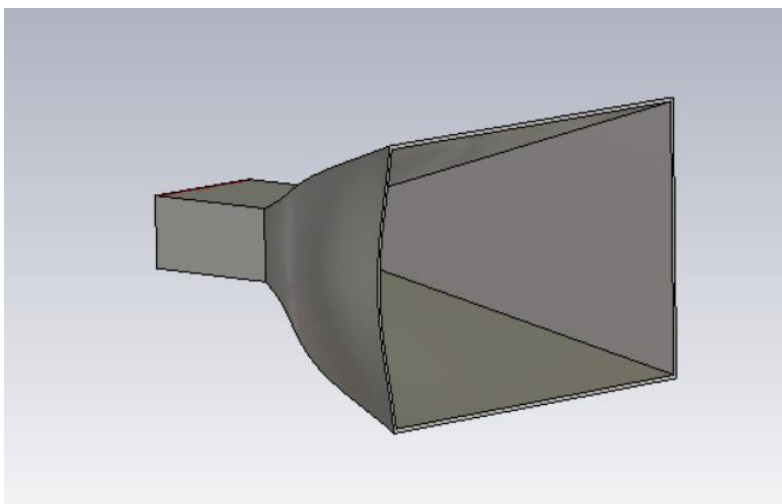


Рис. 3. Модель рупора с изгибом стенки.

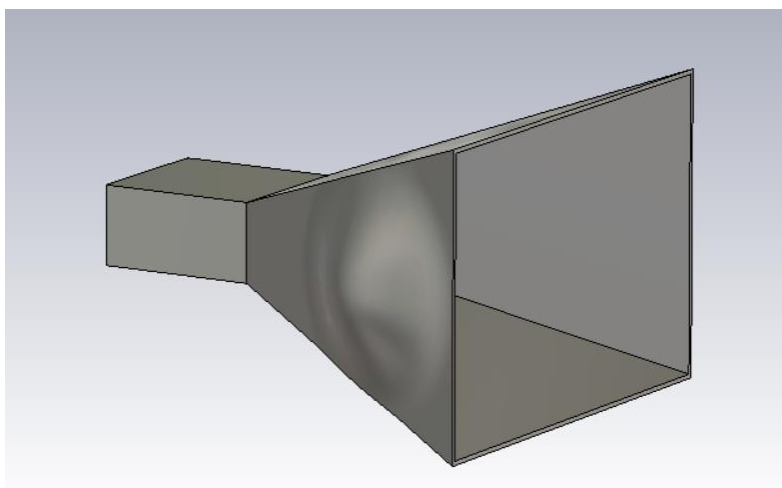


Рис. 4. Модель рупора с вмятиной в стенке.

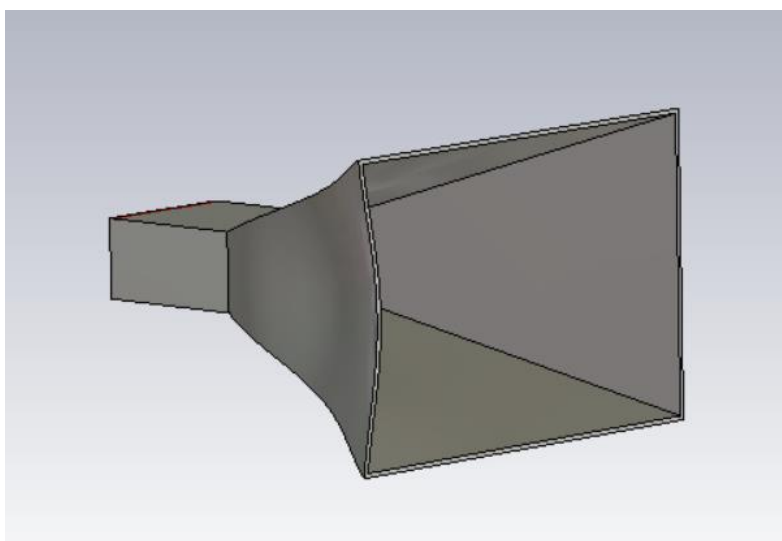


Рис. 5. Модель рупора с изгибом стенки.

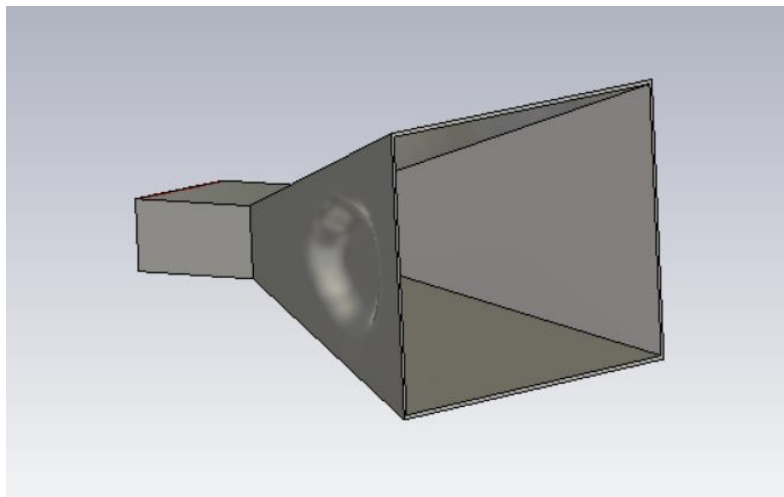


Рис. 6. Модель рупора с вмятиной в стенке.

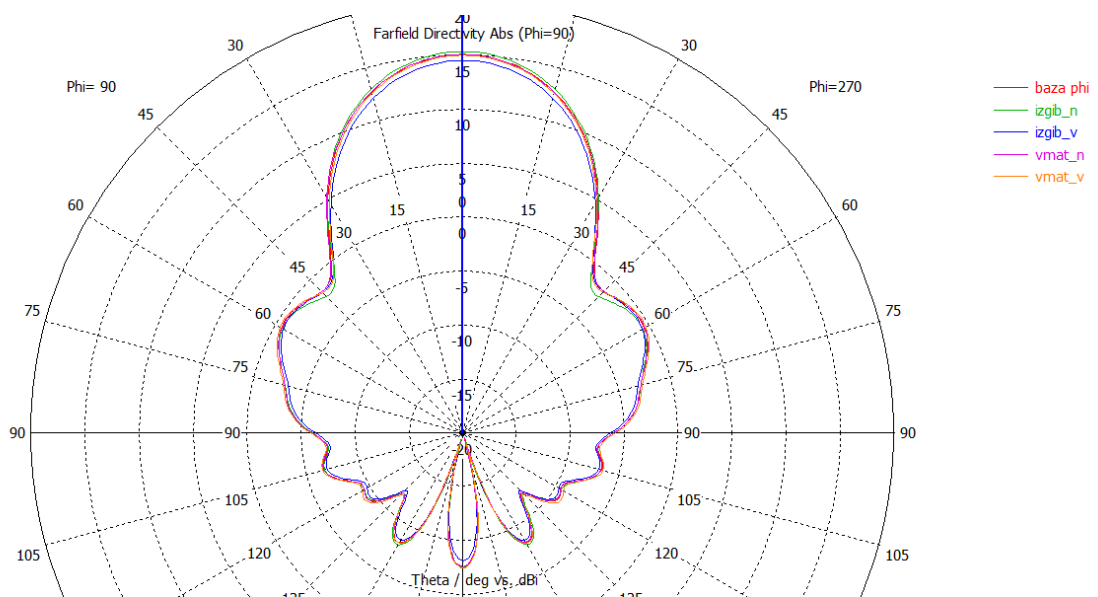


Рис. 7. ДН рупора с изгибами и вмятинами стенки (1 проекция).

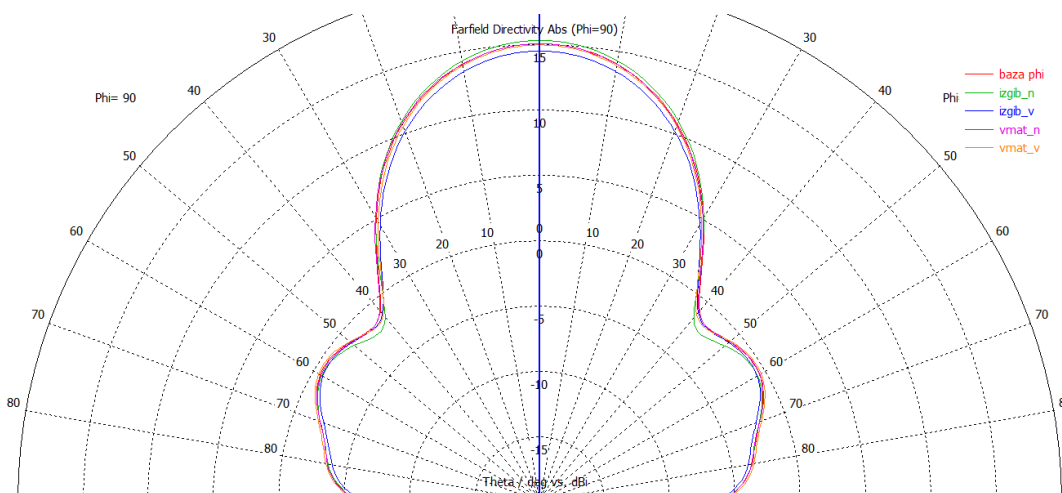


Рис. 9. ДН рупора с изгибами и вмятинами стенки, передняя полусфера (1 проекция).

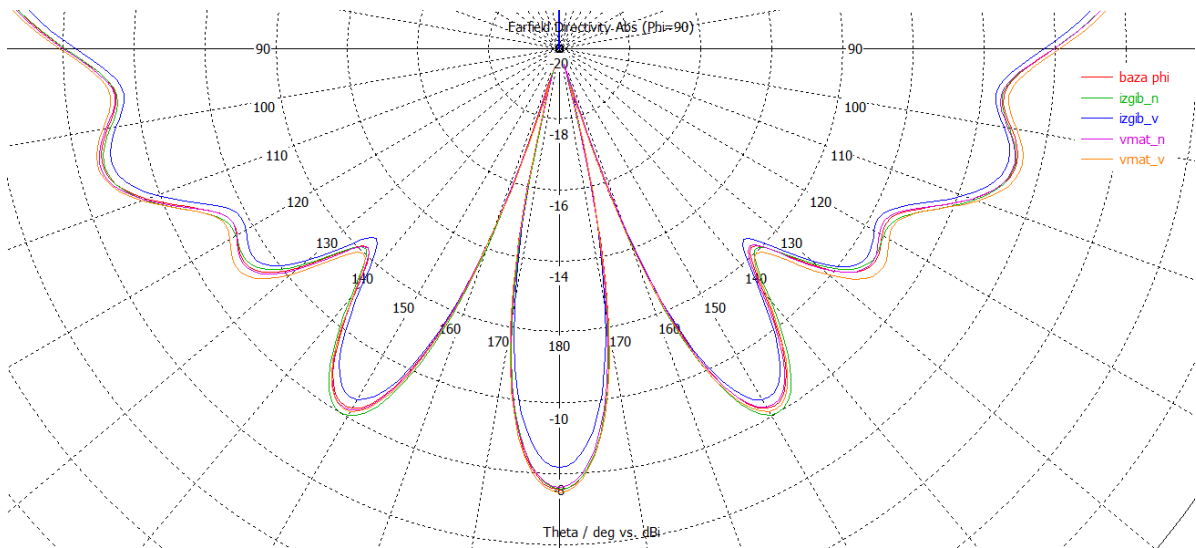


Рис. 10. ДН рупора с изгибами и вмятинами стенки, задняя полусфера (1 проекция).

Используя визуальный способ оценки полученных ДН, можно судить о том, что на частоте 7 ГГц несмотря на то, что повреждения раскрыва довольно значимые, сильных влияний в основной лепесток они не вносят. Однако на частоте 9 ГГц изменения ДН уже более значительны.

Коэффициент корреляции

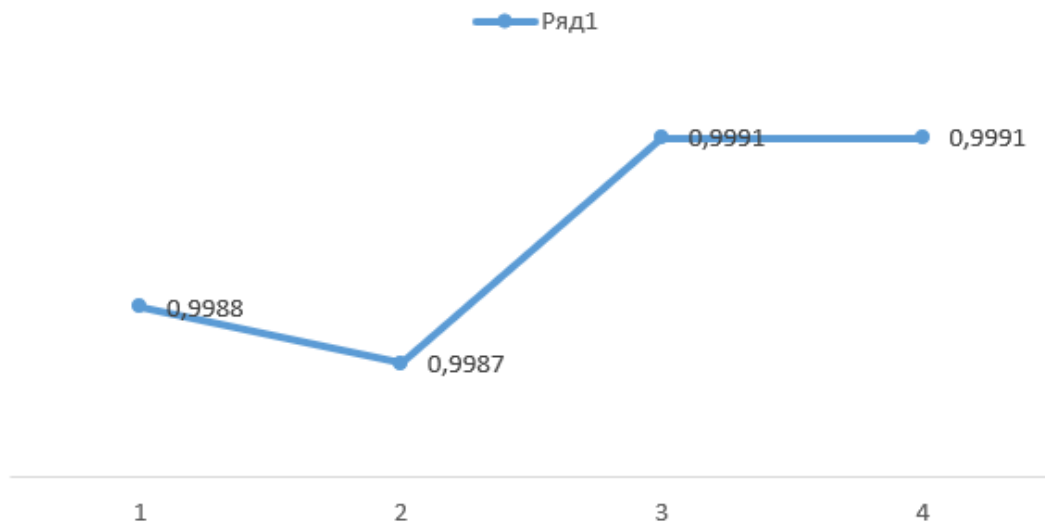


Рис. 11. Коэффициент корреляции полученных ДН и изначальной.

Анализируя изменение коэффициента корреляции можно судить о том, что изменения произошедшие с ДН незначительны.

2.3 Моделирование рупора с царапиной на раскрыве рупора

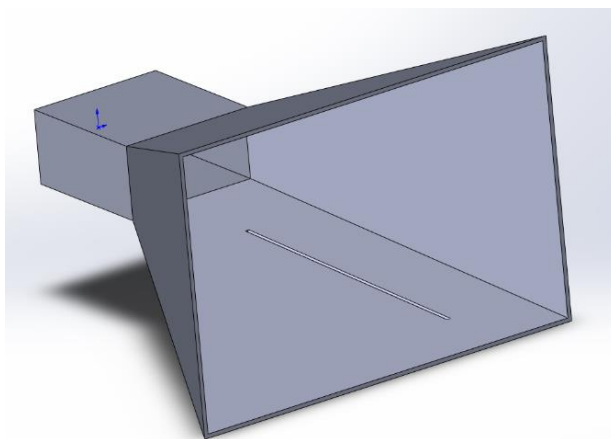


Рис. 12. Модель рупора с царапиной.

Моделирование царапины проводилось при различной глубине. Было проведено моделирование при глубине 0.3 мм, 0.6мм, 1мм, сквозная царапина.

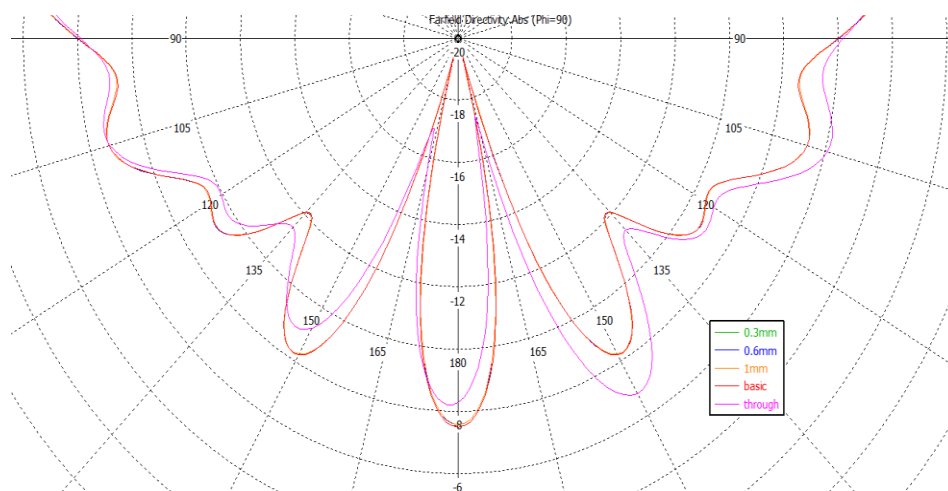


Рис. 13. ДН рупора с царапиной 1 проекция.

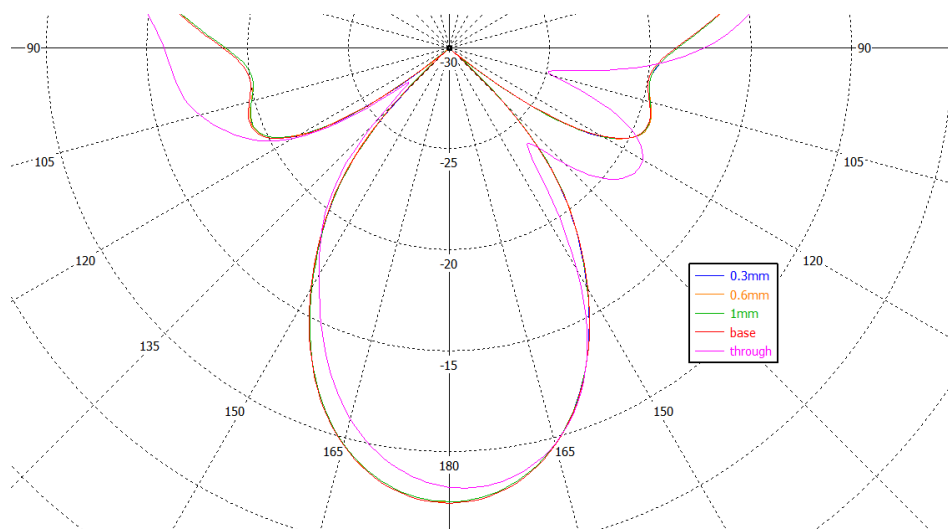


Рис. 14. ДН рупора с царапиной 2 проекция.

2.4 Моделирование рупора с волноводом, засоренным сухим песком

Для анализа влияния засорения волновода сухим песком на диаграмму направленности рупора был проведен ряд моделирований, где рупор был засорен от 10 процентов до 90 процентов. Было проведено 10 итераций моделирований. При моделировании материал песка задавался из встроенной библиотеки CST. Диэлектрическая проницаемость сухого песка (sandy soil (dry)) – 2,53.

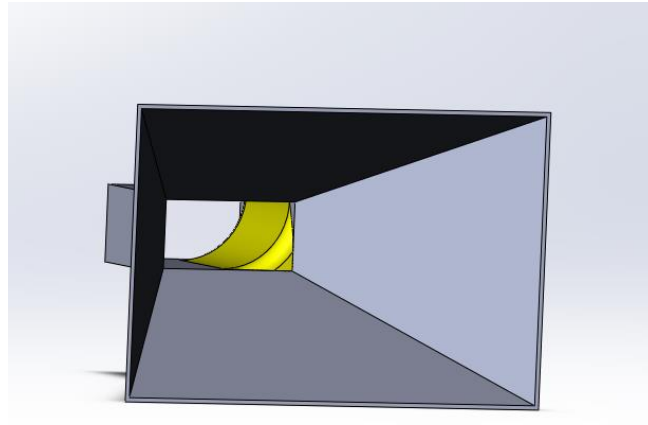


Рис. 15. Модель рупора с сухим песком.

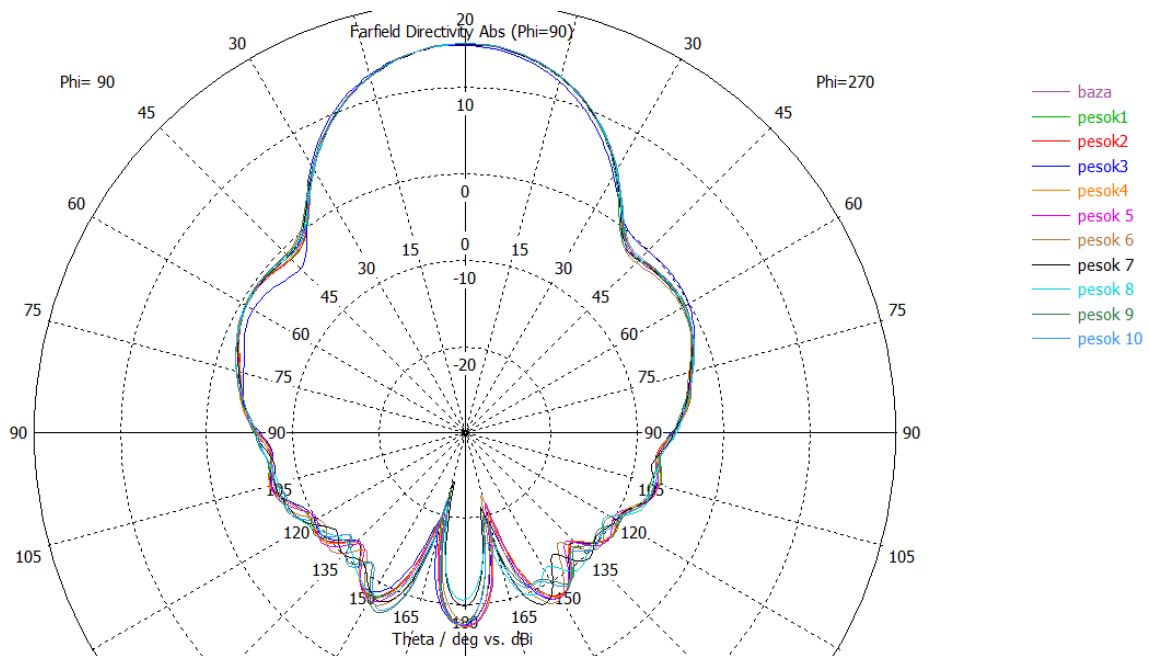


Рис. 16. ДН рупора с сырым песком (1 проекция).

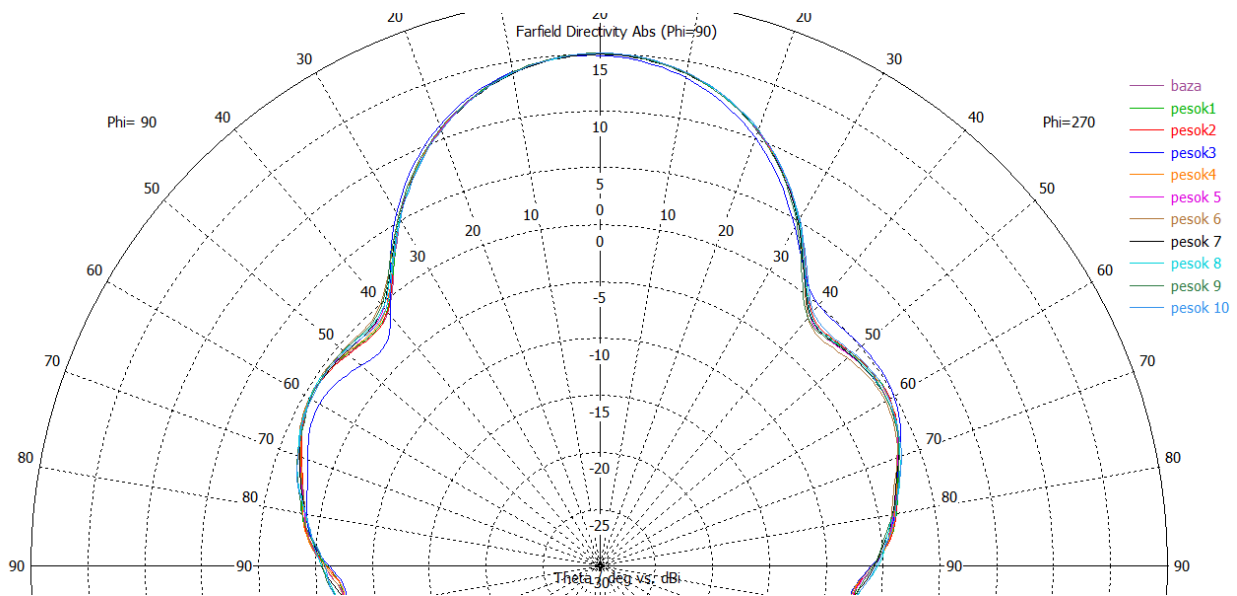


Рис. 17. ДН рупора с сухим песком передняя полусфера (1 проекция).

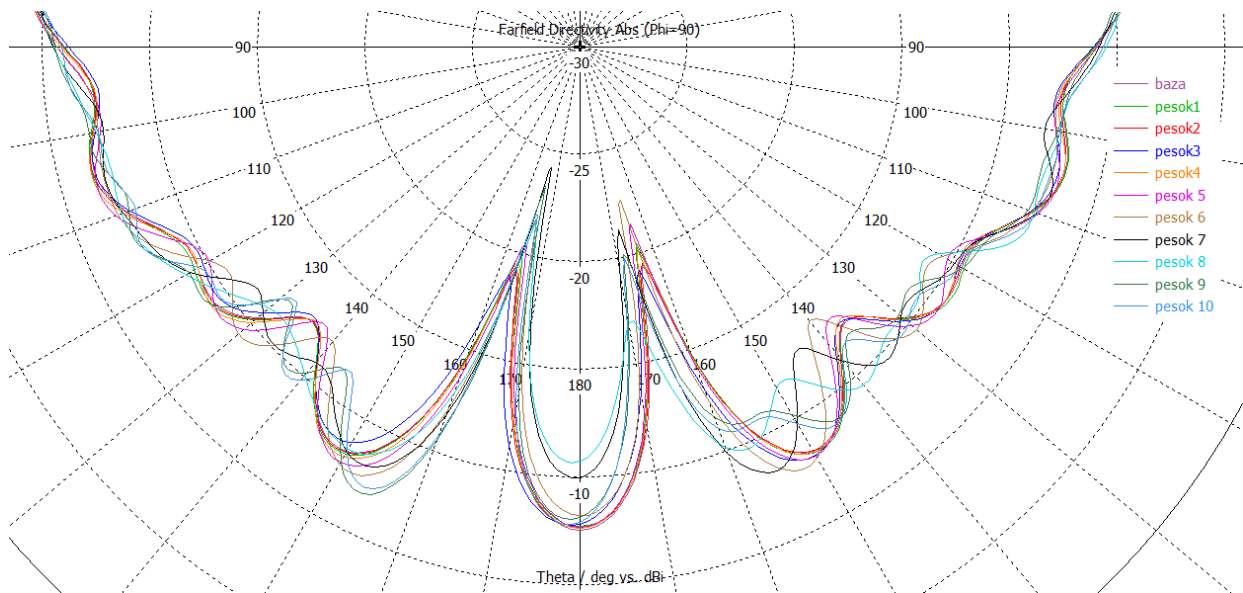


Рис. 18. ДН рупора с сухим песком задняя полусфера (1 проекция).

2.5 Моделирование рупора с волноводом, засоренным влажным песком

Для анализа влияния засорения волновода сухим песком на диаграмму направленности рупора был проведен ряд моделирований, где рупор был засорен от 10 процентов до 80 процентов. Было проведено 9 итераций моделирований. При моделировании материал песка задавался из встроенной библиотеки CST. Диэлектрическая проницаемость сырого песка (sandy soil (wet)) – 13. В связи с тем, что влажный песок вносит значимые изменения в диаграмму, рассмотрим данный случай более детально. Рассмотрим набор диаграмм в двух проекциях.

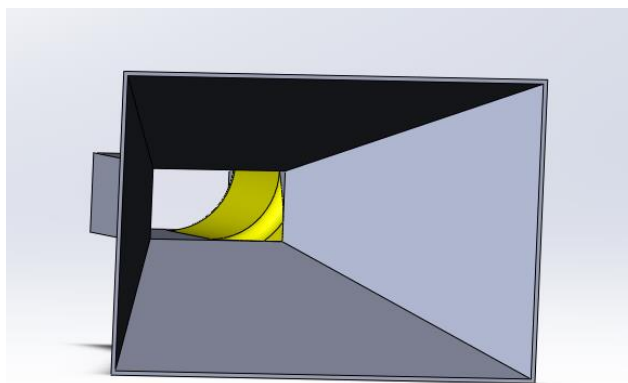


Рис. 19. Модель рупора с влажным песком.

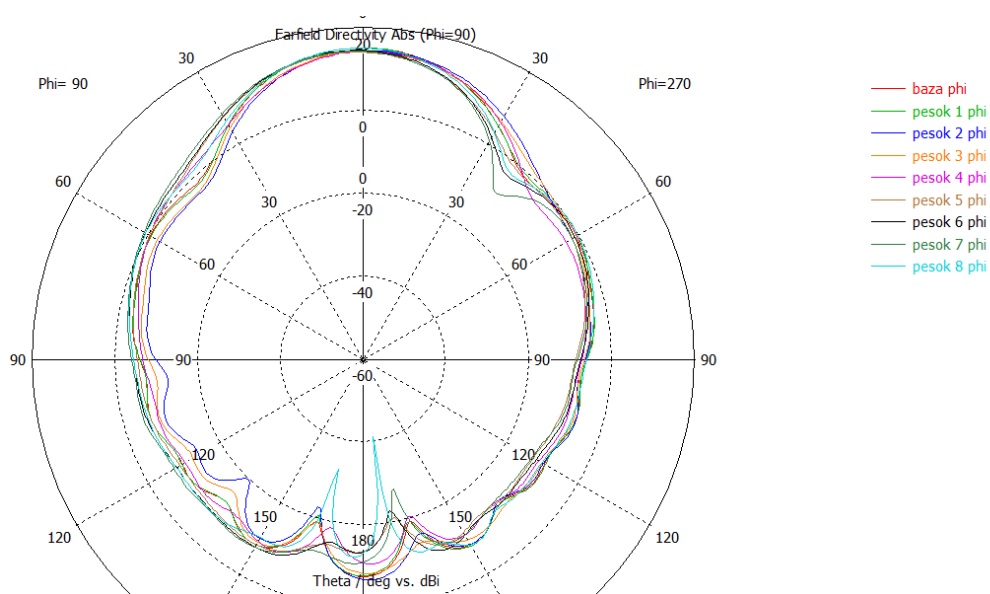


Рис. 20. ДН рупора с влажным песком (1 проекция).

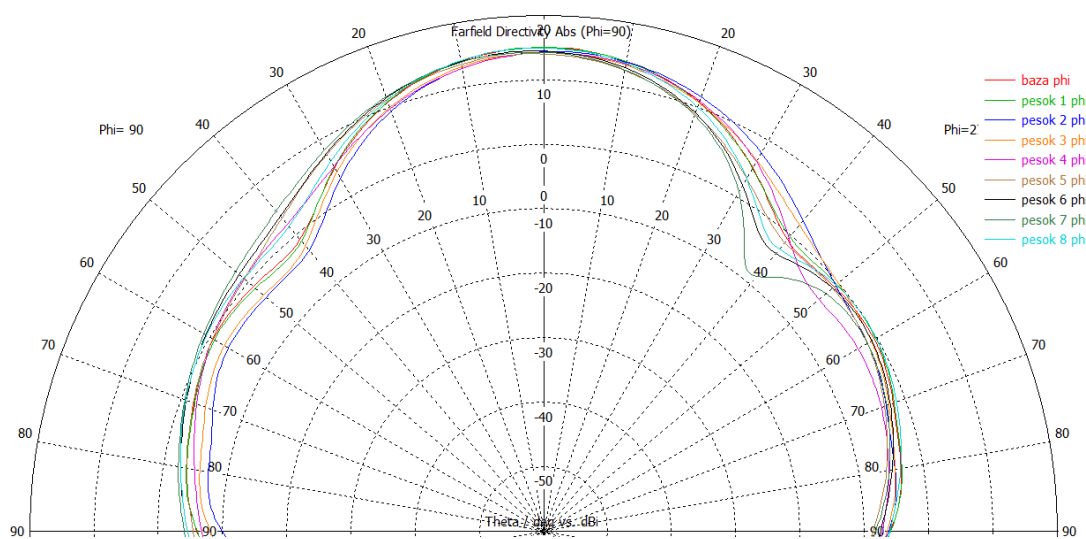


Рис. 21. ДН рупора с влажным песком передняя полусфера (1 проекция).

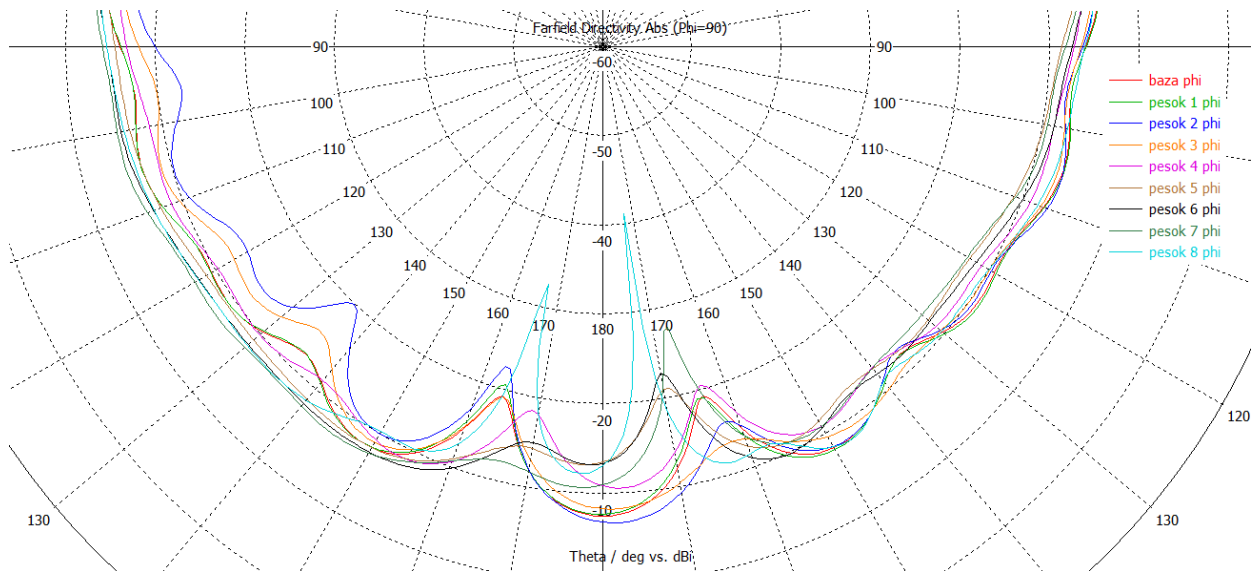


Рис. 22. ДН рупора с влажным песком задняя полусфера (1 проекция).

Для наглядности полученных результатов был выведен коэффициент корреляции полученных результатов. И исходя из полученных значений можно судить о линейности изменений ДН.



Рис. 22. Коэффициент корреляции полученных ДН и изначальной.

2.6 Моделирование рупора с дефектом сварного шва волновода

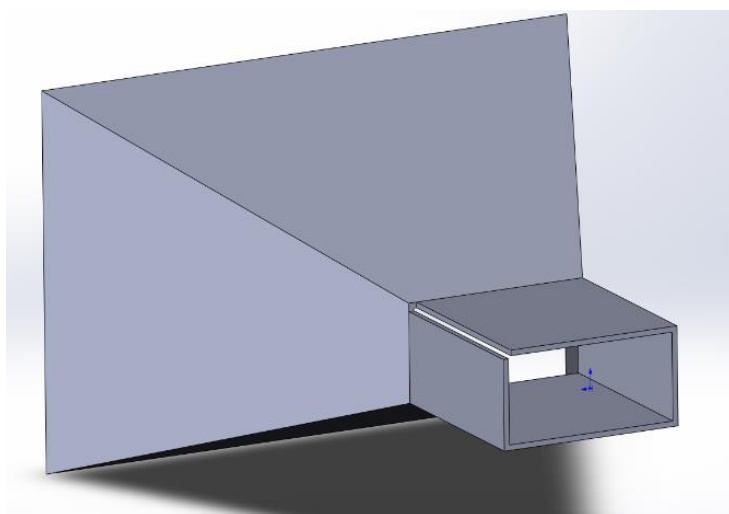


Рис. 23. Рупор с дефектом сварного шва волновода.

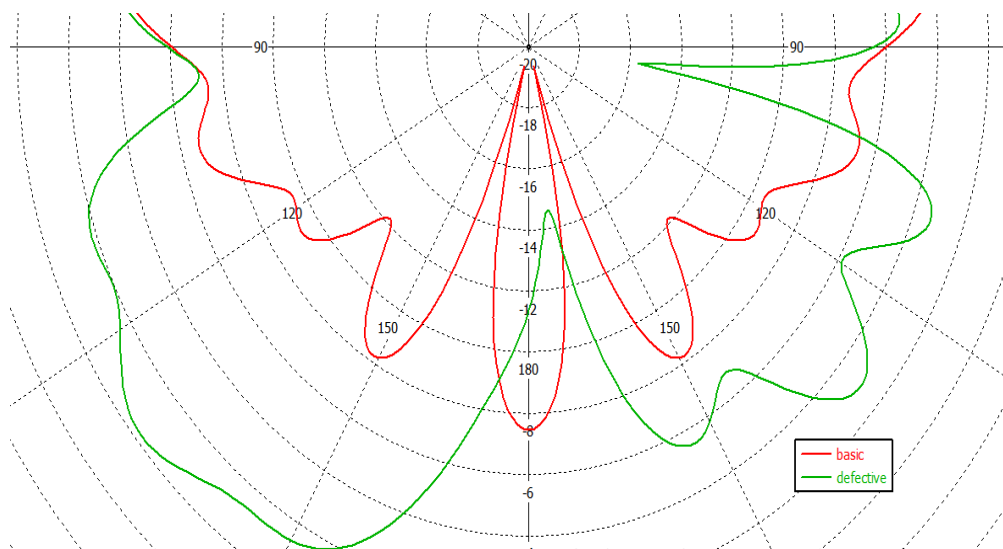


Рис. 24. ДН рупора с дефектом волновода (1 проекция).

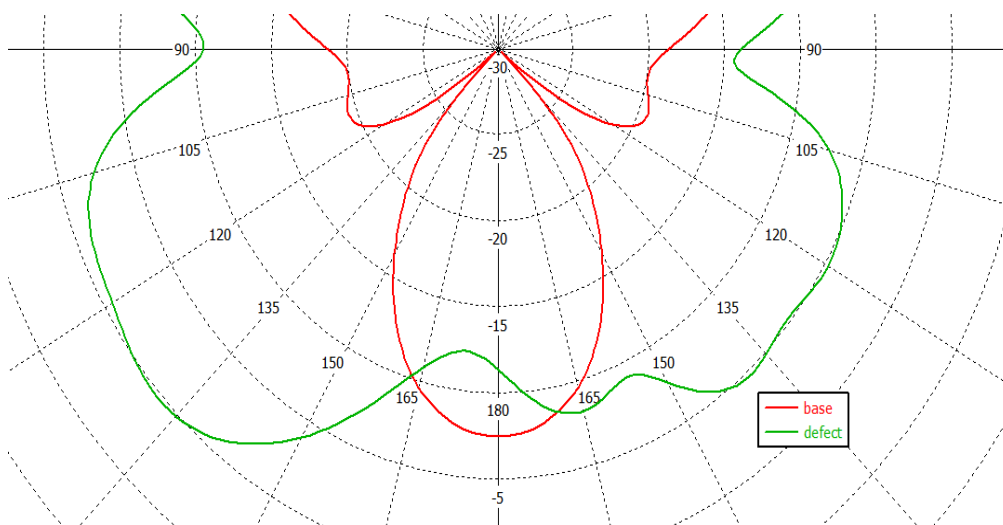


Рис. 25. ДН рупора с дефектом волновода (2 проекция).

2.7 Моделирование рупора с нарушением сварного шва на стыке волновода с раскрывом

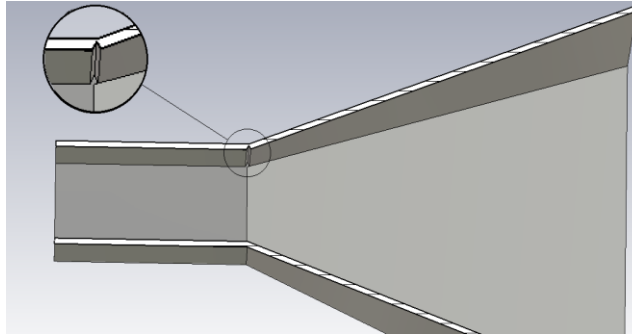


Рис. 26. Модель рупора в сечении с нарушением сварного шва на стыке волновода с раскрывом.

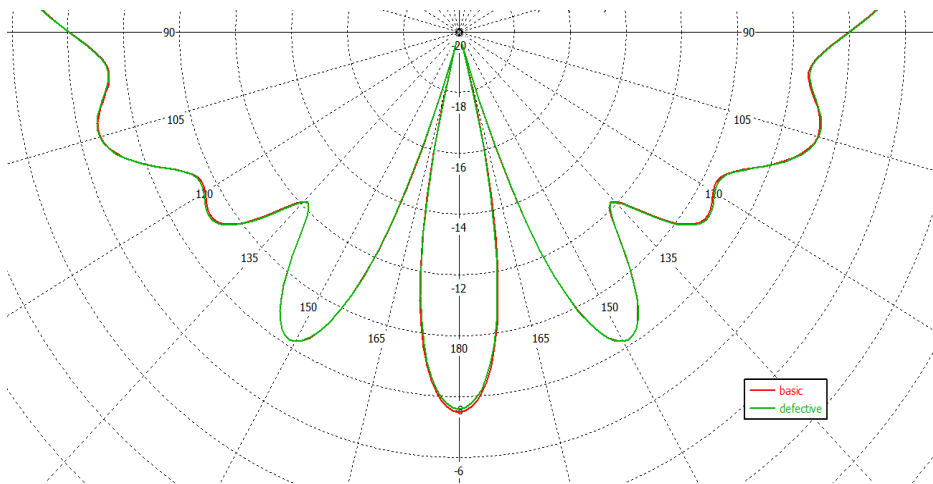


Рис. 27. ДН рупора с нарушением сварного шва на стыке волновода с раскрывом (1 проекция).

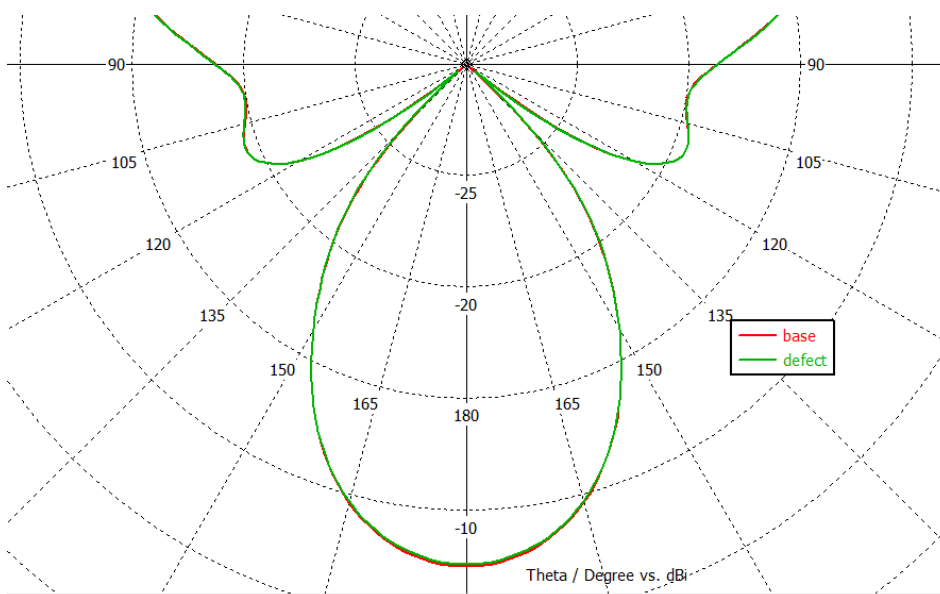


Рис. 28. ДН рупора с нарушением сварного шва на стыке волновода с раскрывом (1 проекция).

2.8 Моделирование рупора с нарушением сварного шва на раскрыве

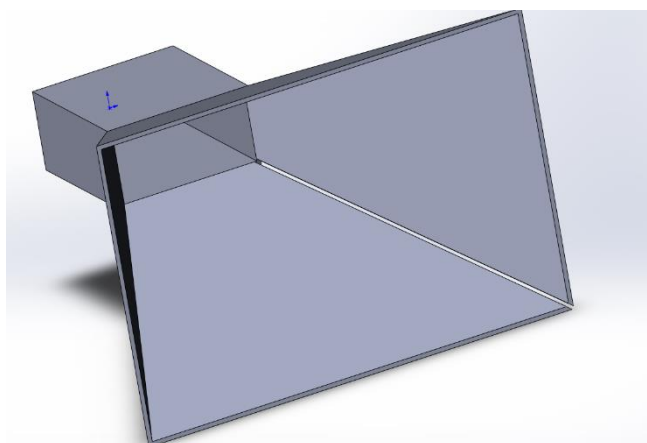


Рис. 29. Модель рупора с нарушением сварного шва на раскрыве.

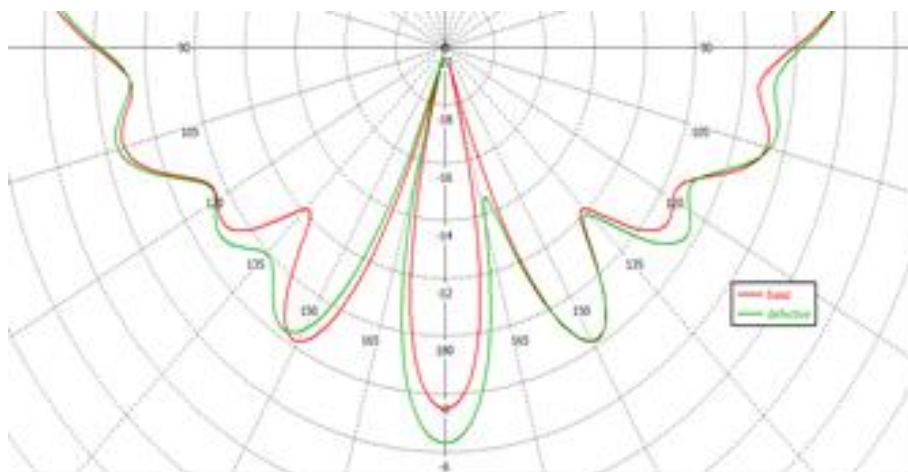


Рис. 30. ДН рупора с нарушением сварного шва на раскрыве (1 проекция).

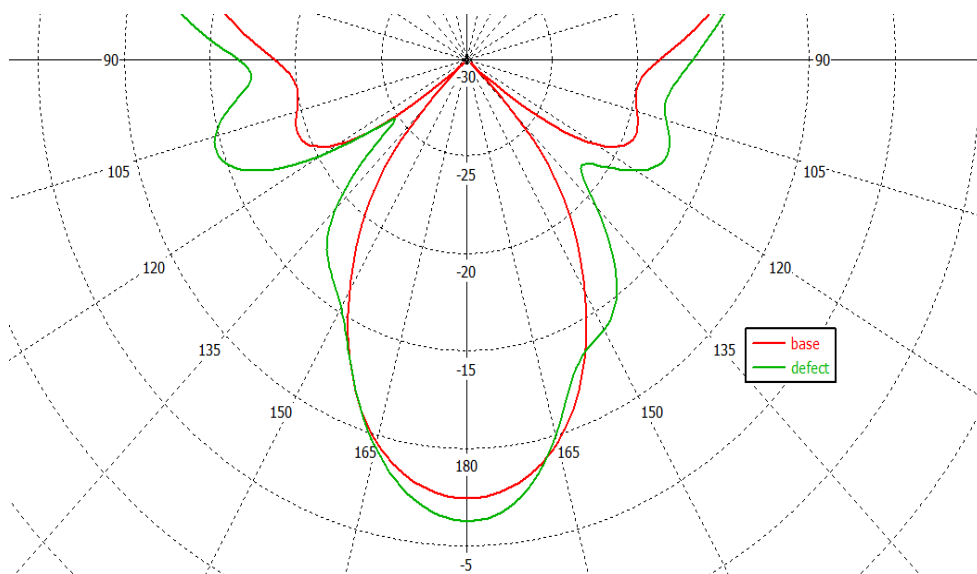


Рис. 31. ДН рупора с нарушением сварного шва на раскрыве 2 проекция.

3. Анализ результатов

1) Рупор с изгибом стенки.

При данном виде повреждения можно заметить незначительное отклонение диаграммы направленности от исходного варианта без дефектов.

2) Рупор со вмятиной в стенке.

При данном виде повреждения в первой проекции сохраняется форма диаграммы направленности, однако уровень заднего лепестка уменьшился на 2 дБ. Во второй проекции заметно сильное искажение диаграммы направленности в левой области.

3) Рупор с царапиной.

В обеих проекциях заметное искажение диаграммы направленности происходит при сквозной царапине на стенке антенны. При других значениях глубины царапины сохраняется форма и уровень заднего и боковых лепестков.

4) Рупор с основанием, засоренным песком.

Заметное изменение диаграммы направленности происходит, если в волноводе размещен сырой песок. Это связано с тем, что диэлектрическая проницаемость сырого песка выше, чем диэлектрическая проницаемость сухого песка. При наличии сухого песка в волноводе рупорной антенны диаграмма направленности сохраняет свою форму и имеет схожий уровень боковых и задних лепестков.

5) Рупор с нарушением сварного шва волновода.

В ходе данного моделирования можно пронаблюдать сильное искажение всех лепестков задней полусферы со значительным изменением их уровня. Становится сложно распознать задний и боковые лепестки.

6) Рупор с нарушением сварного шва между раскрывом и волноводом.

Изменение диаграммы направленности не происходит (происходит незначительно). Уровни боковых лепестков остаются прежними.

7) Рупор с нарушением сварного шва раскрыва рупора и волноводом.

При нарушении сварного шва на раскрыве антенны происходит искажение лепестков в обеих плоскостях, при этом в первой плоскости уровень заднего

лепестка увеличивается на 3 дБ. Во второй проекции заметно сильное искажение и увеличение боковых лепестков.

Заключение

В ходе проведенного исследования можно отметить, что основное влияние на диаграмму направленности из рассмотренных вносят именно механические повреждения волновода и основания рупора. Происходит искажение заднего и боковых лепестков, при анализе которых и будет оцениваться работоспособность антенны в рассматриваемом методе. При этом стоит отметить, что одним из вероятных нарушений может быть разрушение сварного шва. Это может быть результатом как нарушения технологии производства, так и износа антенны.

Помимо этого, заметное влияние вносит засорение рупора сырым песком. Данное повреждение не требует демонтажа антенны и может быть легко исправлено при ремонте в условиях ангара.

Проведенное моделирование основных механических повреждений подтверждает необходимость дальнейших исследований и разработку основанной на анализе ближнего поля системы контроля и диагностики. Моделирование нарушений конструкции антенн в части влияния на амплитудно-фазовое распределение токов в апертуре антенны и/или на диаграмму ее направленности позволит в дальнейшем оценить чувствительность предлагаемых методов контроля работоспособности к их выявлению.

Литература

1. Антипов В. Н. и др. Основные направления развития авиационных бортовых РЛС // Успехи современной радиоэлектроники. – 2009. – №. 10.
2. Синани А. И. и др. Антенный полигон для измерения параметров антенн с электронным управлением лучом // Антенны. – 2008. – №. 9.
3. Бахрак Л.Д. и др. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне. – Изд-во «Наука», Ленинградское отделение, 1985.

4. Johnson R. C., Ecker H. A., Hollis J. S. Determination of far-field antenna patterns from near-field measurements //Proceedings of the IEEE. – 2005. – Т. 61. – №. 12. – С. 1668-1694.
5. Шифрин Я. С. Антенны. – 1976.
6. Бахрах Л. Д., Воскресенский Д. И. Проблемы антенной техники. – Радио и связь, 1989.

Для цитирования:

Матвеев А.М., Золотенкова М.К., Боцкалев Н.А., Моделирование ряда неисправностей рупорной антенны, возможных в условиях эксплуатации авиационных бортовых радиолокаторов. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.7.11>