

УДК 621.372.837.1

**Исследование электродинамических характеристик
электромеханического волноводного переключателя Ка-диапазона в
программной среде AnsoftHFSS 10.0**

***Орлов Н. Е., студент**
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технологии приборостроения»*

*Научный руководитель: Руденко Н.Р., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технологии приборостроения»
k_rl6@bmstu.ru*

Введение

Волноводный переключатель – устройство, предназначенное для коммутации СВЧ трактов. Существуют полупроводниковые, ферритовые и механические переключатели. СВЧ-переключатели широко используются в СВЧ системах:

- в РЛС для резервирования передатчиков
- в РЛС для подключения к высокомошной нагрузке
- в РЛС в целях тестирования
- в спутниковой связи для резервных целей
- в тестовых системах.

В рамках данной статьи рассматривается электромеханический двухканальный переключатель Ка-диапазона (26,5 - 40 ГГц).

Принцип работы волноводного механического переключателя

Механические переключатели выполняются, как правило, с помощью роторных конструкций, изображенных на рисунке 1. Роторный переключатель состоит из корпуса, к которому подсоединяются коммутируемые каналы, и ротора, который поворачивается для переключения каналов. Ротор содержит один или два прямоугольных волноводных изгиба. Просачивание энергии между каналами определяется зазором между ротором и корпусом. Для уменьшения этого просачивания применяется система дросселей. Механические переключатели выполняются как с ручным, так и с электромеханическим управлением.

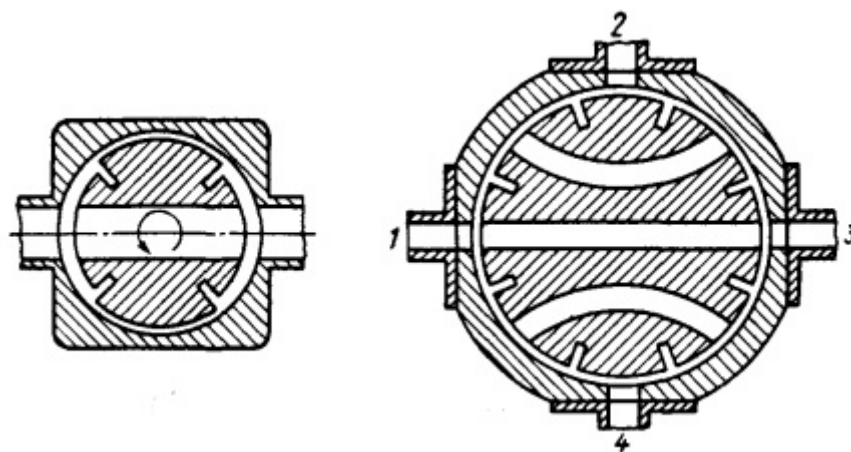


Рис. 1. Механические роторные переключатели

Выбор изгиба волноводного тракта

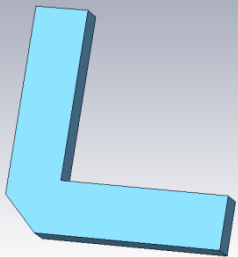
Ротор переключателя содержит поворотную изогнутую часть волноводного тракта. В переключателях рассматриваемого исполнения Ка-диапазона используются волноводные изгибы, имеющие прямоугольное сечение с размерами 7,2х3,4 мм. Существуют различные реализации поворота, такие как уголковые и радиусные изгибы.

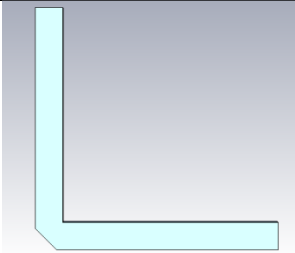
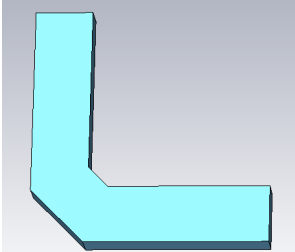
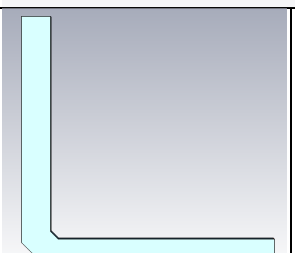
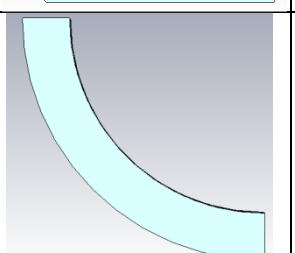
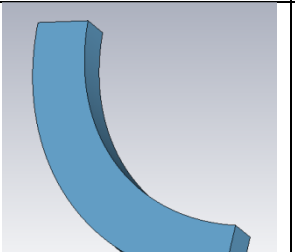
В рамках данной статьи для расчета параметров матрицы рассеяния использовался пакет *AnsoftHFSS 10.0.HFSS* – это пакет программ, который вычисляет *S*-параметры и электромагнитные поля в трехмерных пассивных структурах произвольной формы. HFSS использует для решения уравнений электродинамики метод конечных элементов (*FiniteElementMethod*), включающий адаптивное генерирование и деление ячеек.

В среде электродинамического моделирования *AnsoftHFSS 10.0* была создана модель волноводного поворота. Вакуум помещен в идеальный проводник с граничными условиями $E_t=0$ (тангенциальная составляющая электрического вектора равна нулю).

Таблица 1

Варианты волноводного изгиба

Название	Изображение	Размеры оптимальной конструкции	Коэффициент отражения, дБ
Уголковый изгиб в Н-плоскости с усечением одного угла		Длина фаски, мм 4,54	-18,74

Угловой изгиб в Е-плоскости с усечением одного угла		Длина фаски, мм 2,65	-27,92
Угловой изгиб в Н-плоскости с усечением двух углов		Длина малой фаски, мм 2,16 Длина большой фаски, мм 6,48	-29,63
Угловой изгиб в Е-плоскости с усечением двух углов		Длина малой фаски, мм 1,02 Длина большой фаски, мм 3,06	-27,6
Радиусный изгиб в Е-плоскости		Радиус изгиба, мм 14,5	-51,3
Радиусный изгиб в Н-плоскости		Радиус изгиба, мм 16,1	-47,8

Из полученной таблицы очевидно, что радиусный изгиб в Е и Н плоскостях оказался наименее отражающим вариантом конструкции волноводного поворота.

Влияние зазора между ротором и корпусом на уровень отражений

Для нормального функционирования переключателя, необходимо, чтобы посадка ротора и корпуса была с зазором. Это обеспечит надежность и быстродействие конструкции. С другой стороны зазор является неоднородностью и ухудшает согласование подвижной и неподвижной частей волноводного тракта. Изучим влияние этого зазора на электродинамические характеристики, для этого смоделируем место стыка

волноводных частей и зазор между ними. Модель стыка подвижной и неподвижной частей изображена на рисунке 2.

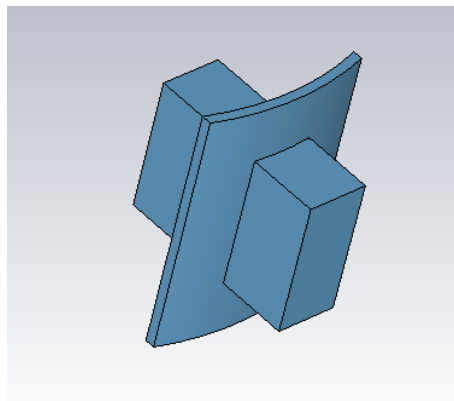


Рис. 2. Модель зазора между волноводами

На рисунке 3 приведены коэффициенты отражения для различных величин зазора, по ним можно судить о том, что неоднородность в виде зазора отрицательно сказывается на прохождении электромагнитной энергии по волноводному тракту. С увеличением зазора увеличивается отражение, следовательно, необходимо стремиться к минимизации зазора между корпусом и ротором.

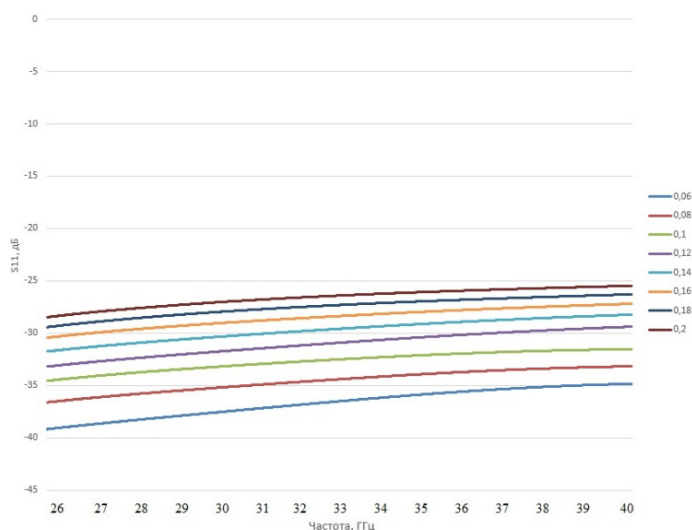


Рис. 3. S_{11} – коэффициент отражения

Дроссельная система

Другим средством согласования электрического соединения являются дроссельные системы. Они используются в местах разрыва токонесущих поверхностей, особенно там, где часто бывает разборка, или там, где отдельные части тракта перемещаются относительно друг друга. Большинство дроссельных систем основано на применении короткозамкнутой полуволновой передающей линии, короткое замыкание, будучи трансформированным в плоскость сочленения, поддерживает непрерывность электрического контакта в соединении, несмотря на наличие там механического зазора.

Существует несколько вариантов исполнения дроссельной системы. Кольцевой дроссельный фланец для прямоугольных волноводов представлен на рисунке 4, а. Одна часть – четвертьволновая линия (размер B приблизительно равен четверти длины волны) с коротким замыканием на конце – имеет форму коаксиальной линии. Другая часть представляет собой радиальный волновод с радиусом $l/4$, где l – длина волны в волноводе. Вследствие неоднородности возбуждения на периферии прямоугольного волновода точная конструкция дросселя находится опытным путем.

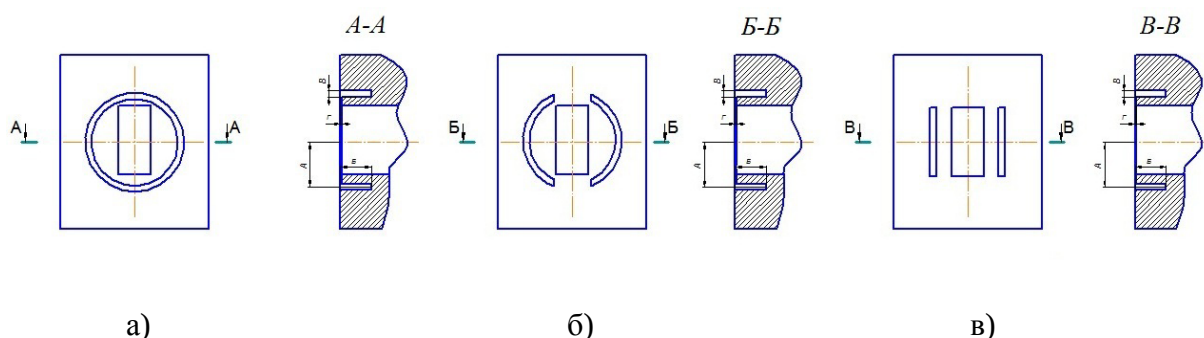


Рис. 4. Виды дроссельных фланцев

Также существуют дроссели в форме полуколец (рис. 4, б.) и в форме параллельных щелей (рис. 4, в.), их геометрические размеры аналогичны, размерам кольцевого дросселя.

Исследуем влияние дроссельных канавок на электродинамические характеристики фланца. Назначим зазор 0,2 мм основным для исследования. Выберем конструкцию дроссельных канавок в форме параллельных щелей, так как все указанные выше разновидности дросселей имеют схожие электродинамические характеристики. Модель изображена дроссельного фланца с параллельными щелями изображена на рисунке 5. Согласно принципам работы плоского дроссельного фланца радиальная и

коаксиальная части должны иметь размеры близкие к четверти длины волны центральной частоты Ка-диапазона – 33 ГГц. Четверть длины волны для частоты 33 ГГц – 2,27 мм.

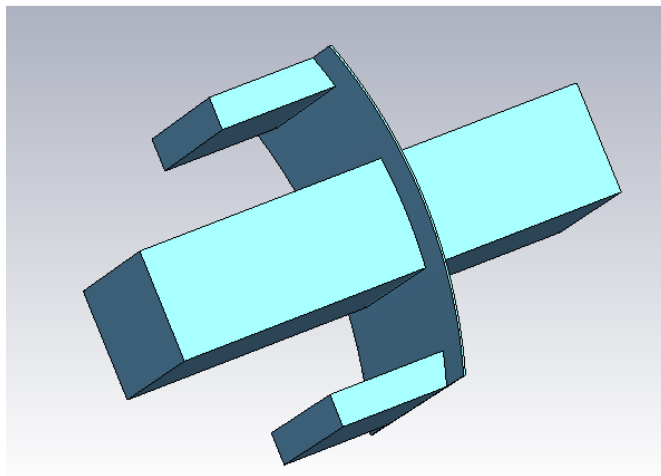


Рис. 5. Модель дросельного фланца

Оптимальные характеристики для цилиндрического дросельного фланца были получены при размерах, указанных на рисунке 6. Максимальное значение S_{11} было получено по краям диапазона -34,83 дБ.

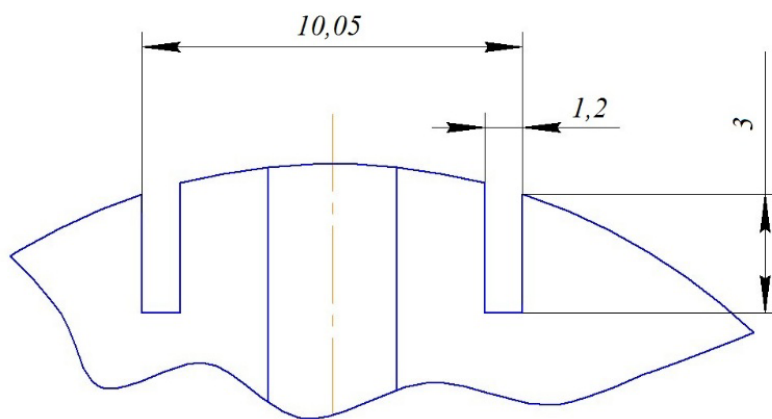


Рис. 6. Размеры дросельного фланца с оптимальными характеристиками

Рассмотрим характеристики модели переключателя с дросельной системой, изображенной на рисунке 7.

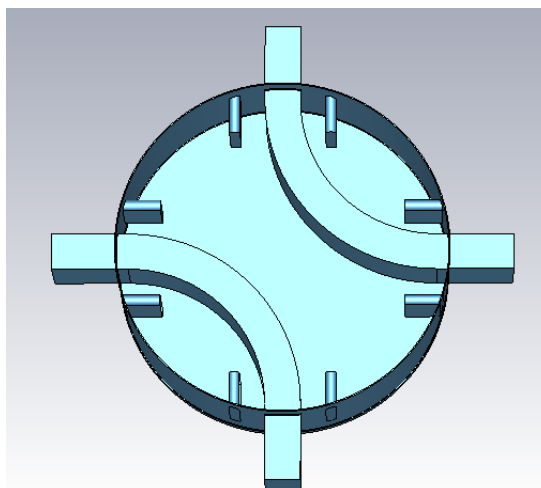
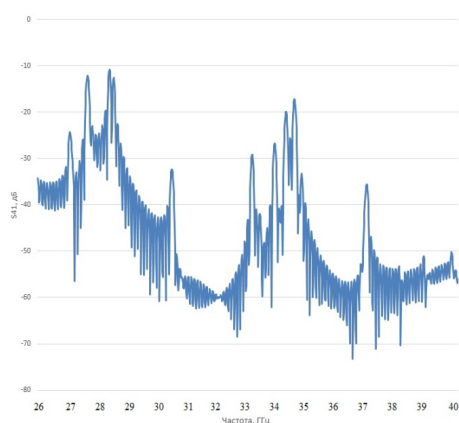
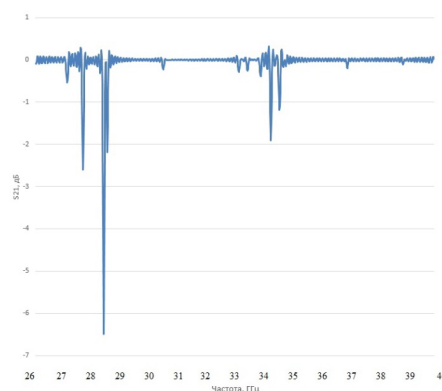


Рис. 7. Модель переключателя с дроссельной системой

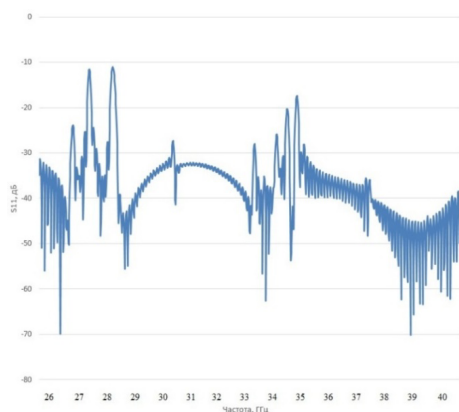
На рисунке 8 представлены полученные характеристики: коэффициент отражения, вносимые потери, развязка первого порта с третьим, развязка первого порта с четвертым.



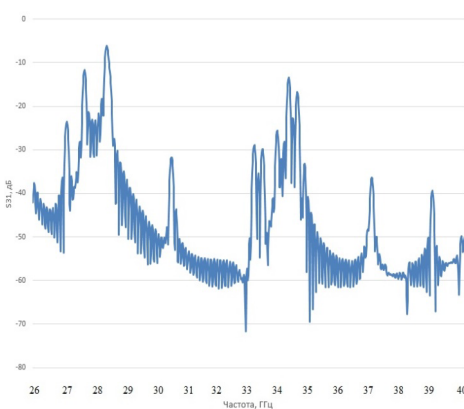
а)



б)



в)



г)

Рис. 8. Характеристики переключателя с системой дроссельных фланцев

На некоторых частотах диапазона в системе возникают резонансные явления, вызываемые отраженными волнами. Полученные характеристики являются неприемлемыми. Худшие значения приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения характеристик переключателя с дроссельной системой

Параметр	S11, дБ	S21, дБ	S31, дБ	S41, дБ
Худшее значение	-11,1	-6,5	-6,2	-10,8

На рисунке 9 изображено распространение электромагнитного поля по конструкции: часть энергии, попавшей в зазор между ротором и корпусом переключателя, отражается от дросселя обратно в волноводный тракт, другая часть распространяется далее по зазору между статором и ротором и воздушное пространство сверху и снизу конструкции, проникая в другие порты и ухудшая развязку.

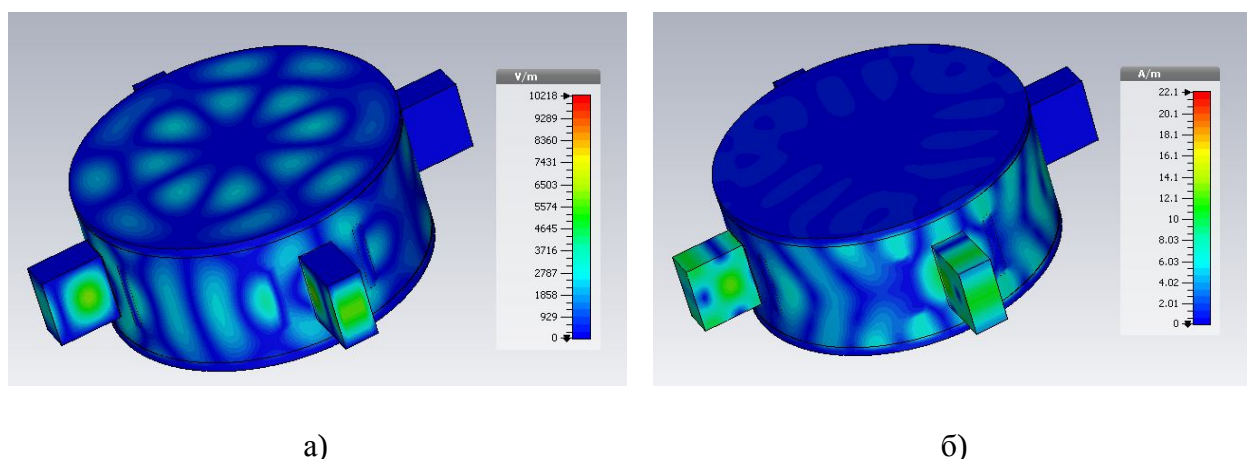


Рис. 9. Эпюры электрического и магнитного полей в переключателе с дроссельной системой

Исследование влияния вставок из радиопоглощающего материала на характеристики переключателя

Для устранения резонансных явлений и улучшения развязки было решено применить вставки из радиопоглощающего материала. По одной из классификаций радиопоглощающие материалы делятся на резонансные и нерезонансные.

Резонансными радиопоглощающими материалами обеспечивается погашение отраженного от поверхности поглотителя излучения частью его, прошедшей по толщине материала. Эффект погашения максимален при толщине поглотителя, равной одной

четверти длины волны излучения. Отраженные поверхностью поглотителя волны находятся «в противофазе». Образуется интерференционная картина поглощения исходной волны. Резонансные (частотнонастроенные) поглощающие материалы имеют узкий рабочий диапазон. Под рабочим диапазоном частот здесь будем понимать интервал частот, в котором заданные параметры и характеристики материала или устройства сохраняются в установленных пределах.

В нашем случае рабочий диапазон устройства – Ка-диапазон (26,5 – 40 ГГц). Центральная частота – 33 ГГц, если использовать резонансный материал, настроенный на эту частоту, то приемлемый уровень поглощения ответвившейся энергии будет обеспечен на частотах 31 – 35 ГГц ввиду узкого рабочего диапазона резонансного материала. На границах рабочего диапазона электромагнитная энергия будет слабо поглощаться резонансным материалом и проникать через зазоры в другие порты, вызывая плохую развязку. Следовательно, использование резонансных радиопоглощающих материалов в данном устройстве неэффективно.

Нерезонансные объёмные материалы обычно используются в виде относительно толстых слоев, поглощающих большую часть подводимой энергии до подхода и возможного отражения волны от металлической задней пластины. Поглощение может быть вызвано как диэлектрическими, так и магнитными потерями, последнее — за счет добавления соединений феррита. В некоторых случаях используется введение графита в пенополиуретановую матрицу. Например, известен материал, содержащий микросферы карбонильного железа или феррита. При облучении радиоволнами, содержащиеся в объеме молекулы феррита под действием переменного магнитного поля приходят в колебательное движение, преобразуя энергию высокочастотного излучения в тепло.

Нерезонансные объёмные материалы могут иметь высокий уровень поглощения электромагнитной энергии в широком диапазоне частот. На сегодняшний день существуют жидкие, твердые и гибкие резиноподобные нерезонансные материалы со сходными характеристиками. Выбор конкретного материала ограничивается технологичностью его получения и обработки, шириной рабочего диапазона и его коэффициентом отражения.

Для исследования влияния вставок из радиопоглощающего материала на характеристики переключателя были использованы типичные на сегодняшний день характеристики, а именно, коэффициент отражения -20 дБ/см. Для погашения волн, распространяющихся во всех зазорах, вставки были установлены в пазы в роторе, а также на верхнем и нижнем его торцах. Модель переключателя с радиопоглощающими вставками изображена на рисунке 10.

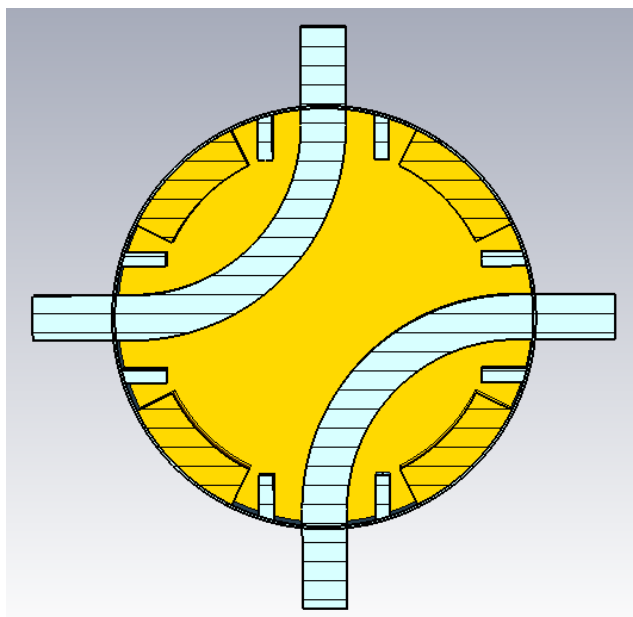
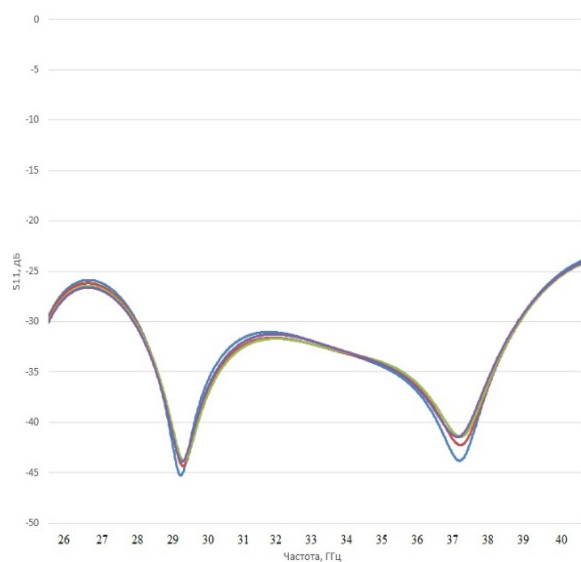
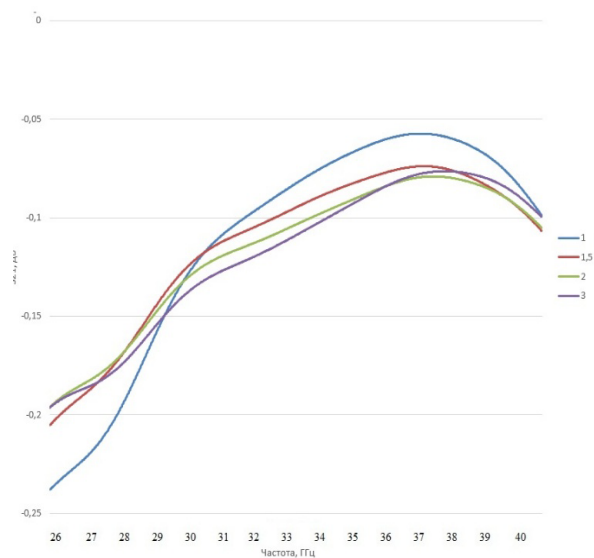


Рис. 10. Модель переключателя со вставками из радиопоглощающего материала в разрезе

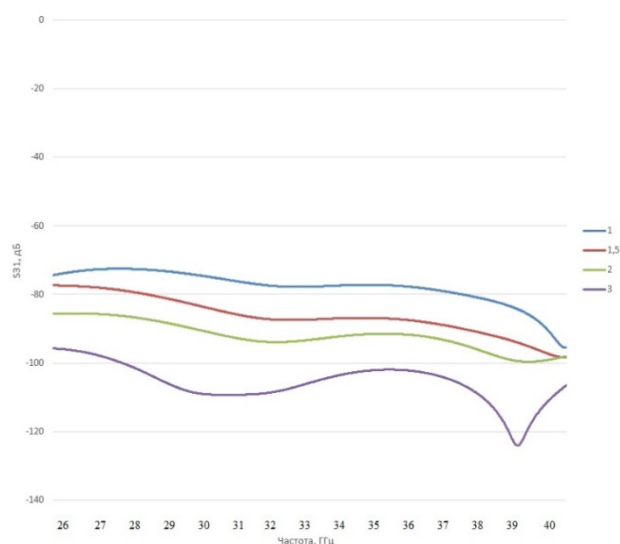
Как известно, толщина нерезонансного поглотителя определяется лишь необходимым уровнем затухания, у нее нет жесткой привязки к длине волны. Для исследования будем последовательно изменять толщину вставок от 1 до 3 мм при неизменности остальной конструкции и сравнивать полученные электродинамические характеристики. На рисунке 11 изображены характеристики переключателя при разных толщинах поглощающего материала. С ростом толщины вставок из поглощающего материала увеличивается поглощение ответвившейся в зазоры энергии. Очевидно, что, меняя толщину вставок, можно добиться высокого уровня изоляции (более 80 дБ) и малого коэффициента отражения (менее 20 дБ), при приемлемом уровне вносимых потерь (менее 0,2 дБ).



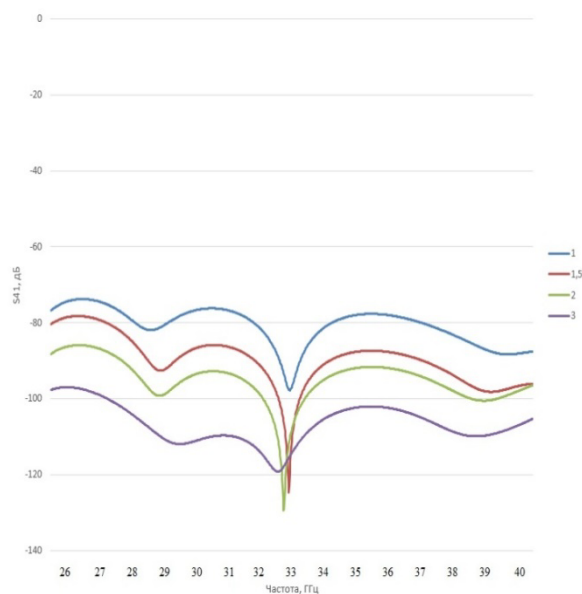
а)



б)



в)



г)

Рис. 11. Характеристики переключателя с системой дроссельных фланцев и вставками из радиопоглощающего материала

Заключение

В статье кратко приведено исследование электродинамических характеристик электромеханического волноводного переключателя Ка-диапазона. Была выявлена оптимальная конструкция волноводного тракта. Электродинамическое моделирование в программной среде AnsoftHFSS 10.0 позволило существенно сократить время и усилия, затраченные на разработку устройства.

Список литературы

1. Харвей А.Ф. Техника сверхвысоких частот: пер. с англ. В 2 т. Т. 1 / под ред. В.И. Сушкевича. М.: Советское радио, 1965. 783 с. [A.F. Harvey. Microwave engineering. London and New York : Academic Press, 1963.].
2. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высшая школа, 1988. 432 с.
3. Метрикин А.А. Антенны и волноводы РРЛ. М.: Связь, 1977. 184 с.
4. Надененко С.И. Антенны. М.: Связьиздат, 1959. 548 с.
5. Баскаков С.И. Электродинамика и распространения радиоволн. М.: Либроком, 2015. 420 с.