

Улучшение электрических характеристик гибкой волноводной секции

Е.А. Самородова

АО «ИЭМЗ «Купол», г. Ижевск

Аннотация: в данной работе рассматриваются проблемы и пути совершенствования гибких волноводных секций (ГВС), используемых в высокочастотных системах. Основное внимание уделено гофрированной структуре, которая обеспечивает механическую подвижность и сохранение электромагнитных характеристик. В работе предложены инновационные решения для сохранения формы, защиты от пробоев, улучшения электромагнитной совместимости и защиты от влаги. Разработанная новая модель ГВС демонстрирует улучшенные электрические характеристики, включая стабильность в диапазоне частот 1–30 ГГц, низкий коэффициент стоячей волны (КСВ) и повышенную механическую надежность.

Ключевые слова: гибкая волноводная секция, гофрированная структура, вибрационная устойчивость, СВЧ-техника

1. Введение

Гибкая волноводная секция (ГВС) – это элемент волноводного тракта, предназначенный для соединения двух волноводных узлов, к одному из которых предъявляются повышенные требования по виброустойчивости. Например, к передатчику СВЧ, кроме обычных требований на уменьшение потерь, низкого КСВН, предъявляются требования к амплитудно-фазовой модуляции. Она вызвана в первую очередь воздействием вибрационных испытаний в широком диапазоне механических нагрузок.

Гибкие секции изготавливаются из металла (обычно латунь, медь или алюминий) и могут иметь разные формы:

- Гофрированная структура — волновод выполнен в виде гармошки, что обеспечивает изгиб в одной или нескольких плоскостях.
- Шарнирные соединения — состоят из нескольких коротких жёстких сегментов, соединённых подвижными элементами.
- Спиральные волноводы — используются в вращающихся антенных системах (например, в радарх).

Рассмотрим гофрированную структуру, потому что ее часто используют на производстве.

Гофрированная структура — один из самых распространённых типов гибких волноводов, используемых в СВЧ-технике. Она обеспечивает механическую подвижность, сохраняя при этом электромагнитные характеристики тракта.

1.1 Конструкция и материалы

Основные элементы:

- Гофрированная металлическая трубка: изготавливается из меди, латуни, алюминия или нержавеющей стали, имеет продольную или спиральную гофрировку (ребристая поверхность).
- Фланцы или переходы: на концах волновода устанавливаются стандартные фланцы.

- Защитное покрытие: некоторые модели имеют внешнюю изоляцию для защиты от влаги и механических повреждений.

Типы внешней гофрировки представлены в таблице 1.

Таблица 1. Типы внешней гофрировки

Тип	Описание	Преимущества	Недостатки
Продольная гофрировка	Гофры идут параллельно оси волновода	Лучшая гибкость в одной плоскости	Менее устойчива к скручиванию
Спиральная гофрировка	Гофры навиты по спирали	Равномерная гибкость во всех направлениях	Большие потери на высоких частотах
Кольцевая гофрировка	Гофры расположены кольцами	Высокая механическая прочность	Ограниченная гибкость

1.2 Принцип работы

Гофрированная структура работает как электромагнитный волновод, но благодаря рёбрам жёсткости может изгибаться без существенного ухудшения характеристик:

- электромагнитная волна распространяется внутри гладкой внутренней поверхности.
- гофры позволяют секции сжиматься, растягиваться и изгибаться, компенсируя:
 - смещение жёстких волноводов;
 - вибрации;
 - термические деформации.

1.3 Основные параметры

Основные параметры для гофрированных ГВС представлены в таблице 2.

Таблица 2. Типы внешней гофрировки

Параметр	Типовые значения	Влияние на работу
Диапазон частот	1–110 ГГц (зависит от диаметра)	Определяет рабочую полосу
КСВ	1.1–1.5	Чем ближе к 1, тем лучше
Минимальный радиус изгиба	3×D (для спиральной), 5×D (для продольной)	Чем больше радиус, тем меньше потерь
Максимальное растяжение/сжатие	±5–10% от длины	Важно для подвижных систем
Мощность передачи	До нескольких кВт (в непрерывном режиме)	Ограничена пробоем
Длина (оптимальная)	100±50 мм	Потери

1.4 Преимущества и недостатки

Преимущества:

- Гибкость – компенсирует смещения до нескольких сантиметров.
- Прочность – выдерживает вибрации и умеренные механические нагрузки.

- Широкополосность – работает в широком диапазоне частот.

Недостатки:

- Потери выше, чем у жёстких волноводов (особенно на частотах >30 ГГц).
- Ограниченный радиус изгиба (не подходит для очень компактных систем).
- Чувствительность к перекручиванию (может повредить гофры).

1.5 Области применения

Радиолокация – компенсация подвижек в антенных системах.

Спутниковая связь – соединение антенн с приёмопередатчиками.

Авиация и космос – устойчивость к вибрациям в бортовой аппаратуре.

Медицинская техника – СВЧ-гипертермия, диагностика.

Промышленные СВЧ-установки – печи, плазменные генераторы.

Многие предприятия ОПК используют гибкие волноводные секции с гофрированной структурой в активной радиолокации.

Предприятием АО «ИЭМЗ «Купол» было получено ТЗ на создание гибкого волноводного тракта, в котором требовалось минимизировать вибрационный сигнал и обеспечить электромагнитную совместимость. Большинство ГВС, применяемых на предприятии, не отвечает требуемым параметрам, наиболее приемлемой ГВС является секция, показанная на рисунке 1, которая имеет следующие электрические характеристики:

- Диапазон частот от 1 до 30 ГГц;
- КСВ 1.2;
- Вносимые потери 0,1-0,2 дБ/м;
- Мощность передачи: не менее 60 кВт импульсной мощности.

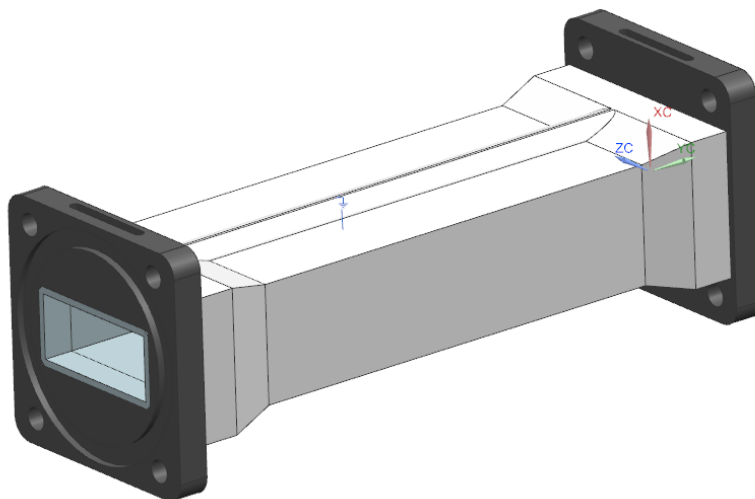


Рисунок 1. 3Д модель серийно выпускаемой на предприятии ГВС

Все перечисленные ранее преимущества присутствуют в данном изделии, но был выявлен ряд недостатков при использовании ГВС в изделиях АО «ИЭМЗ «Купол»:

- Сложность в изготовлении;
- Гигростатирование: если температура падает до точки росы, то внутри волновода образуются капли воды, которые при включении приборов приводят к пробойке волновода;
- Электромагнитная совместимость: данный волновод не электрогерметичен и принимает сторонние сигналы, что отрицательно влияет на работу волноводного

тракта.

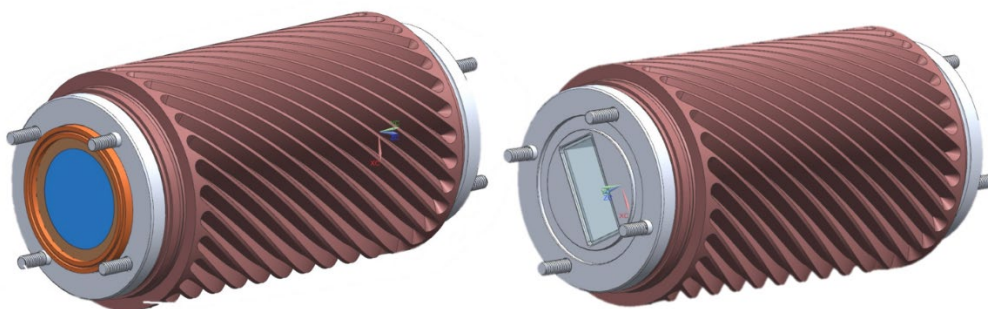
2 Модернизация ГВС

Данная работа посвящена улучшению характеристик ГВС, при этом требовалось:

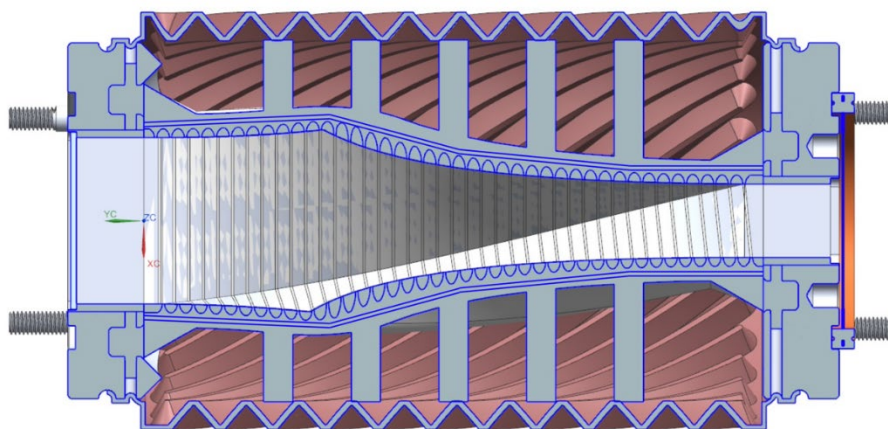
- Не ухудшить электрические характеристики по сравнению с предыдущей версией;

- Улучшить электромагнитную совместимость;
- Сохранить подвижность по все осям;
- Предусмотреть защиту от влаги.

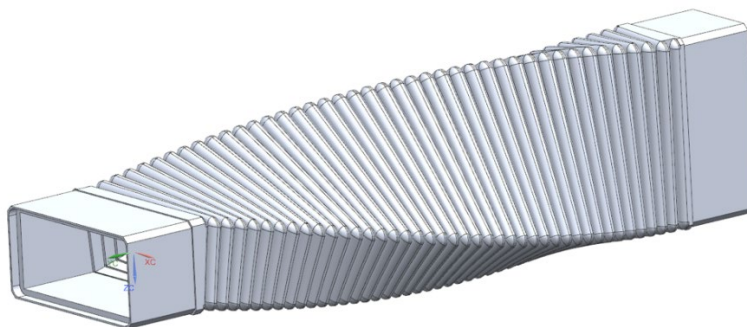
В итоге была разработана новая модель гибкого волноводного тракта (28.5x12.6мм), представленная на рисунке 2.



а)



б)



в)

Рисунок 2. Новая модель ГВС а) Общая сборка; б) Сечение; в) Волновод

Первым пунктом по улучшению гибкого волноводного тракта стал вопрос как сделать так, чтобы волноводный тракт держал форму. Решение следующее – использовать металлический чулок с ячейками менее 0,1 мм, пример представлен на рисунке 3.



Рисунок 3. Металлический чулок с ячейками менее 0,1 мм. от ООО «ВКС»

Вторым пунктом стал вопрос защиты от пробоев, контроля волнового сопротивления и механической стабильности. Волноводную секцию заполняют висксинтом, но уже не как на рисунке 1, а создается круговой резиновый кожух, представленный на рисунке 4.

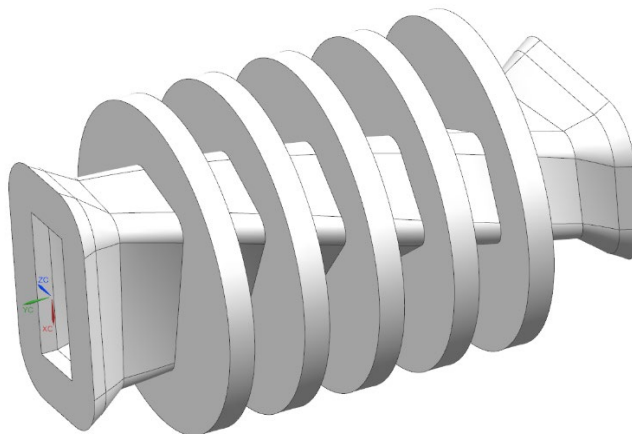


Рисунок 4. Кожух из висксинта

Чтобы обеспечить электромагнитную совместимость был разработан новый гофр (рисунок 5) из меди, который не только защищает волноводный тракт от воздействия чужих сигналов, но и сохраняет подвижность по всем осям, включая скручивание.

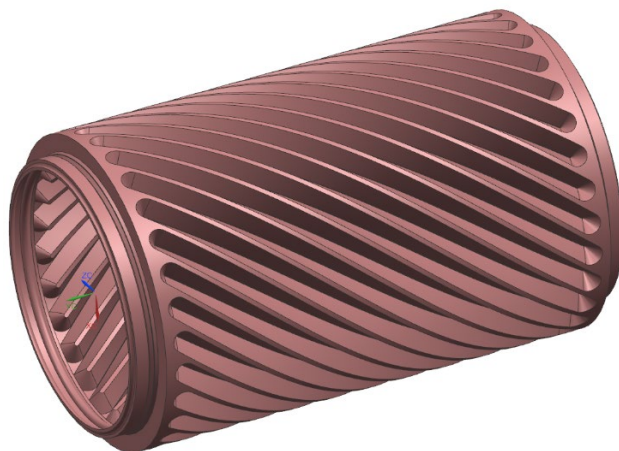


Рисунок 5. Новый гофр из меди

Изготовление металлической гофры для ГВС должно включать следующие этапы:
1. Необходимо предварительно изготовить алюминиевую заготовку (рисунок 6);

2. Гальваническое наращивание на данную заготовку медного электролита толщиной не менее 0,5 мм;
3. Снять 0,1 мм, чтобы получить гладкую поверхность;
4. Далее вытравливаем алюминиевую заготовку в щелочной ванне;
5. Сборка ГВС.

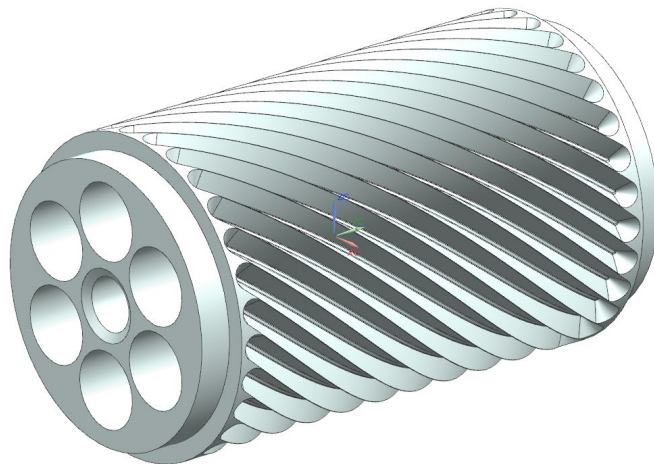


Рисунок 6. Алюминиевая заготовка

Гигростатирование всегда было проблемой для волноводных трактов, поэтому была разработана резинка (рисунок 7) с фторопластом толщиной 0,4мм, которая позволит защитить волноводный тракт от влажности.

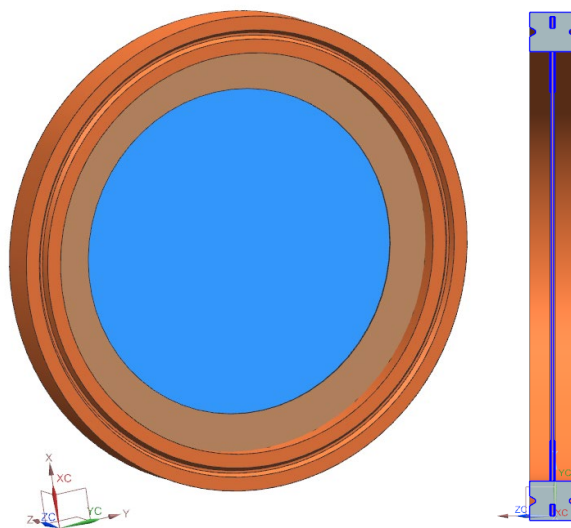


Рисунок 7. Резинка с фторопластом толщиной 0,4 мм.

3. Заключение

ГВС являются важными элементами высокочастотных систем, обеспечивающий надежность в условиях механических воздействий. Их выбор зависит от частотного диапазона, требуемой гибкости и условий эксплуатации.

Таким образом, разработанная ГВС обладает более стабильными электрическими характеристиками, а также устраняет все недостатки предыдущей версии. Представленная разработка направлена на снижение потерь и увеличение срока службы волноводного тракта.