

ВОЗМОЖНОСТЬ И ПРЕИМУЩЕСТВА ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЧАСТИ СВЧ-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА БАЗЕ СТАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ

А.В. Горелова

anastacia.gorelova@mail.ru

SPIN-код: 3721-4040

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены проблемы, возникающие при разработке и изготовлении высокочастотной части СВЧ-энергетических установок дециметрового диапазона, в том числе установок медицинского назначения. Актуальность темы обусловлена чрезвычайно высокой стоимостью существующих технологий изготовления СВЧ-энергетических установок и необходимостью их упрощения и удешевления. Обоснована целесообразность использования стальных волноводов, способствующих значительному уменьшению стоимости, повышению надежности и упрощению технологических процессов. Обоснован выбор участков волноводного тракта, которые должны быть покрыты проводящим защитным слоем. Предложена методика нанесения простого и дешевого цинкового покрытия элементов волноводного тракта. Новизна работы заключается в выработке рекомендаций по созданию волноводного тракта.

Ключевые слова

СВЧ-энергетическая установка, дециметровый диапазон волн, стальной/латунный волноводы, фланец волновода, мода волны, электропроводимость, потери в волноводе, гальваническое покрытие

Поступила в редакцию 11.01.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Первый промышленной магнетрон — генератор СВЧ-энергии был создан в 1940 г. Сразу же после создания магнетрона стали основными элементами самолетных радаров и сыграли важнейшую роль во Второй Мировой войне [1]. Именно радиолокационное применение магнетронов и определило вектор их развития. Благодаря широкому применению фазовых методов определения дальности [2] и доплеровских методов определения скорости [3], на первое место было выдвинуто требование к качеству самой генерируемой СВЧ-волны, а именно к стабильности частоты [4]. Это, в свою очередь, определило и саму структуру радара, когда генерация волны стабильной частоты осуществляется магнетроном низкой мощности с последующим усилением каскадом усилителей, в основном — лампами бегущей волны. В отличие от предыдущего информационного (радиолокационного) применения СВЧ-диапазона, в последнее время широкое распространение получило его энергетическое применение. Объем годовых продаж СВЧ-печей достиг 2 млрд долларов. Американские специалисты считают, что рынок СВЧ-техники имеет огромный потенциал и что в

настоящее время он освоен недостаточно. Причины этого банальны: механизмы, заложенные в СВЧ-нагреве, не знакомы большинству инженеров, их попросту пугает радикальный отход от обычных систем. Именно это и порождает тенденцию сопротивляться реальным инновациям в большинстве отраслей промышленности, несмотря на наличие очевидных преимуществ [5]. В настоящее время применение СВЧ-поля является наиболее эффективным способом введения энергии внутрь тела. Неудивительно, что сейчас наблюдается бурный рост внедрения СВЧ-методов в различные процессы нагрева, в том числе применение СВЧ для отогрева частично замороженных биообъектов. К сожалению, именно «военная предыстория» развития определяет современный подход к созданию СВЧ-техники: экономические аспекты никогда не были в числе приоритетных.

Целью исследования является определение возможности снижения стоимости СВЧ-энергетических установок дециметрового диапазона и определение основных технических требований к волноводу.

Сопоставление потерь в медном и стальном волноводах. Волноводный тракт СВЧ-энергетической установки создается на базе прямоугольного волновода, поперечные размеры которого позволяют осуществлять передачу электромагнитной волны только на основной моде H_{10} . Для СВЧ-установки, функционирующей на разрешенной для использования в промышленности частоте 2450 МГц, рекомендованный размер поперечного сечения волновода составляет 90×45 мм.

Одним из основных требований, предъявляемых к волноводному тракту, является минимизация потерь при прохождении волны. Минимизировать эти потери можно при использовании материалов с высокой проводимостью, таких как медь (латунь). Применение в дециметровом диапазоне широко распространенных стальных труб специалисты не рассматривали, поскольку сталь обладает низкой электропроводностью, что приводит к высоким потерям. Более того, распространено мнение, что энергия электромагнитной волны будет расходоваться на нагрев самого волновода.

Для определения обоснованности данного вывода была выбрана строительная прямоугольная стальная труба с наружным диаметром 100×50 мм и толщиной 2 мм.

Для распространения основного типа волны H_{10} необходимо соблюдение условия [6]

$$a < \lambda < 2a,$$

где a — ширина широкой стенки волновода; $\lambda = 126$ мм — длина волны (2450 МГц).

Таким образом, в прямоугольной трубе с внутренними размерами 96×46 мм (наружными 100×50 мм) может распространяться волновая мода H_{10} , и только эта мода. Погонные потери в прямоугольном волноводе на H_{10} рассчитывают по формуле [7]

$$\alpha = \frac{8,69R_s \left[1 + 2 \left(\frac{b}{a} \right) \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]}{bZ_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2}},$$

где a — погонные потери, дБ/м; $R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\delta_{\text{пр}}}}$ — активное поверхностное сопротивление;

$\delta_{\text{пр}}$ — проводимость (для меди; $\delta_{\text{пр}} = 59,5 \cdot 10^6$ См/м; для стали $\delta_{\text{пр}} = 7,7 \cdot 10^6$ См/м [8]); μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота; f — частота магнетрона, $f = 2450$ МГц; Z_0 — волновое сопротивление, $Z_0 = 120\pi$ Ом.

В результате расчета для стального волновода на частоте 2450 МГц при $a = 96$ мм, $b = 46$ мм было получено $\alpha = 0,033$ дБ/м, для медного волновода размером 23×10 мм (типовые соотношения в радиолокации) на частоте 10000 МГц — соответственно $\alpha = 0,011$ дБ/м. При одной и той же длине волноводов потери в медном волноводе на частоте 10000 МГц и в стальном волноводе на частоте 2450 МГц сопоставимы.

Из сопоставления результатов расчета видно, что говорить о больших потерях на стальных волноводах некорректно. Потери в стальном волноводе соответственно составят 0,2 % на 1 м длины волновода. Для мощности 600 Вт потери составят 1,2 Вт, и нагрев трубы будет незаметен. Таким образом, строительную стальную трубу размером 100×50 мм (ГОСТ 8645–68. Трубы стальные прямоугольные) можно использовать в качестве волновода.

Отметим также, что в настоящее время рыночная цена латунной трубы сечением 90×45 мм длиной 3 м составляет 18 тыс. руб., а цена строительной стальной трубы сечением 100×50 длиной 3 м — 400 руб.

Технологические требования к изготовлению волноводов. У специалистов по электродинамике принято считать, что любые неоднородности, линейные размеры которых не превышают сотых долей длины волны, несущественны [9]. Для диапазона радиолокации с длиной волны 30 мм неоднородности считают существенными, если их размер превышает 100 мкм. Эти размеры учитываются при формулировании требований к изготовлению волноводов: так, фланцы к волноводам принято изготавливать на прецизионных фрезерных станках. В промышленном диапазоне СВЧ (2450 МГц) с длиной волны 126 мм неоднородности являются существенными, если их размер имеет порядок единиц миллиметров. Таким образом, фланцы можно изготавливать на обычном бытовом оборудовании, например внутреннюю часть фланца под волновод можно вырезать с помощью обычной болгарки, а выбор углов выполнить электролобзиком.

Отметим, что существующие технологии крепления фланцев к волноводам предусматривают пайку фланцев к волноводам. Поскольку использование при-

поев на основе олова и свинца не обеспечивает требуемой прочности, пайку обычно выполняют серебром. Для волноводов из стальных труб самый лучший способ крепления — сварка. Известно, что сварные соединения гораздо прочнее паяных. Таким образом, использование стальных труб является более надежным и дешевым.

Требования к покрытию волноводов. Стальные конструкции подвержены окислению и появлению ржавчины. В свою очередь, это приводит к нарушению гальванического контакта. В разных местах волновода это имеет разное значение. Возникновение ржавчины внутри волновода приводит лишь к незначительному увеличению потерь. Однако появление ржавчины на контактной поверхности фланца, приводящее к ограничению площади зон проводимости, может привести к образованию изолированных областей, способных выполнять функции вибраторов. Наиболее опасны зоны, линейные размеры которых кратны половине длины волны (в рассматриваемом примере — 63 мм). В этом случае вероятно создание вибраторных зон [10]. Даже если предусмотрены меры, исключающие СВЧ-излучение наружу, остается возможность резкого возрастания коэффициента стоячей волны, что может привести к срыву генерации магнетрона и даже к выходу его из строя.

Самым надежным и дешевым материалом для изготовления покрытий является цинк. Оцинковка труб осуществляется на специализированных предприятиях. Поскольку речь не идет о массовом производстве, заинтересовать руководство предприятия в оцинковке нескольких волноводов нереально. Помимо этого существуют проблемы с получением самих цинковых пластин в условиях санкций.

В процессе подготовки статьи была разработана технология оцинковки фланцев практически в домашних условиях, которая заключается в следующем.

1. Цинковую смесь в виде желе можно получить из обычных алкалиновых батареек. В нижней части батареек (противоположной выступающей центральной части) имеется круглый бортик. По этому бортику следует сделать надрез болгаркой, срезать шайбу и вынуть ее вместе с внутренним шипом. Находящийся внутри батареек внутренний цилиндр заполнен желеобразным цинком.

2. Нужно изготовить электрод из любого проводящего материала, его толщина не имеет значения. Автором изготовлены электроды из стали толщиной 1 мм. Размеры электрода целесообразно выбрать такими же, как размеры изделия, которое необходимо оцинковать. Далее следует ровным слоем нанести желе на одну сторону электрода.

3. Требуется подключить фланец к отрицательному полюсу устройства для зарядки автомобильных аккумуляторов, а электрод с цинком — к положительному полюсу.

4. Фланец и электрод необходимо поместить в раствор кальцинированной соды (электролит). Через полчаса работы фланец покроется слоем цинка.

Подобным образом изготовлены согласованная нагрузка и аттенюатор СВЧ-энергетической установки медицинского назначения. Впервые элементы

волноводного тракта выполнены из строительных стальных прямоугольных труб. Волноводные элементы (согласованная нагрузка, аттенюатор и др.) функционируют и готовы к вводу в эксплуатацию.

Выводы. 1. Волноводные узлы СВЧ-энергетических установок дециметрового диапазона могут быть изготовлены из строительных стальных прямоугольных труб сечением 100×50 мм.

2. Контактная поверхность фланцев обязательно должна иметь проводящее защитное покрытие.

3. Для обеспечения требований к точности изготовления элементов волноводного тракта не обязательно применять прецизионные обрабатывающие станки.

4. Элементы стального волноводного тракта представляют собой сварные конструкции, поэтому они значительно прочнее паяных конструкций типовых волноводных трактов.

5. Предложенный метод оцинковки фланцев имеет низкую стоимость и может быть воспроизведен в домашних условиях.

Литература

- [1] Invention of magnetron. URL: <http://www.radartutorial.eu/04.history/hi80.en.html> (дата обращения 30.11.2017).
- [2] Пестряков В.Б. *Радиотехнические системы*. Москва, Радио и связь, 1985, 376 с.
- [3] Архипов А.И. *Способ измерения радиальной скорости цели радиолокационной станцией*. Патент 2251710 РФ. Заявл. 14.07.2003, опубл. 10.05.2005.
- [4] Магнетрон. URL: <http://tubeamplifier.narod.ru/mess065.htm> (дата обращения 16.02.2018).
- [5] Advantages of using microwave energy for process heating. URL: <http://www.powderbulksolids.com/article/advantages-using-microwave-energy-process-heating> (дата обращения 30.11.2017).
- [6] Бобков Ю.Ю., Гололобов Д.В., Кирильчук В.Б., Кижлай И.Н., Кухарев А.В., Юрцев О.А. *Исследование прямоугольного волновода и элементов на его основе*. Минск, БГУИР, 2012, 46 с.
- [7] Волна Н10 в прямоугольном волноводе. URL: http://mikpres.ucoz.ru/_ld/0/7___1.pdf (дата обращения 30.11.2017).
- [8] Электропроводность металлов: таблица и расчеты. URL: <http://specural.com/articles/5/elektroprovodnost-metallov-tablica-i-raschety.html> (дата обращения 30.11.2017).
- [9] Голубева Н.С., Митрохин В.Н. *Основы радиоэлектроники сверхвысоких частот*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 486 с.
- [10] Горелов В.В. *Устройство снижения отражений от проводящей поверхности*. Патент 2342747 РФ. Заявл. 18.05.2007, опубл. 27.12.2008.

Горелова Анастасия Витальевна — студентка кафедры «Биомедицинская техника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**THE IMPORTANCE AND ADVANTAGES OF CONSTRUCTING
A HIGH-FREQUENCY PART OF THE SHF-POWER UNITS
ON THE BASIS OF STEEL WAVEGUIDES**

A.V. Gorelova

anastacia.gorelova@mail.ru

SPIN-code: 3721-4040

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article considers the problems arising when developing and manufacturing the high-frequency part of the SHF-power units of ultra high frequency including the installations for medical use. The relevance of this topic stems from the extremely high cost of the existing technologies of manufacturing the SHF-power units and the need for their simplification and cheapening. We justify the expediency of using steel waveguides contributing to significant cost reduction, reliability improvement and technological process simplification. The article provides rationalization for selecting the wave-guide duct sections that must be coated with the conducting protective layer. We offer a simple and cheap zinc coating procedure for the wave-guide duct elements. The scientific novelty of the work lies in the fact that we have made recommendations on creating a wave-guide duct.

Keywords

SHF-power unit, ultra high frequency, steel/ brass waveguide, waveguide flange, wave mode, electrical conductivity, waveguide losses, galvanic coating

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Invention of magnetron. Available at: <http://www.radartutorial.eu/04.history/hi80.en.html> (accessed 30 November 2017).
- [2] Pestryakov V.B. Radiotekhnicheskie sistemy [Radiotechnical schemes]. Moscow, Radio i svyaz' publ., 1985, 376 p.
- [3] Arkhipov A.I. Sposob izmereniya radial'noy skorosti tseli radiolokatsionnoy stantsiy [Measurement technique for radial velocity of radar station target]. Patent 2251710 RF. Appl., 14.07.2003, publ. 10.05.2005.
- [4] Magnetron. Available at: <http://tubeamplifier.narod.ru/mess065.htm> (accessed 16 February 2018).
- [5] Advantages of using microwave energy for process heating. Available at: <http://www.powderbulksolids.com/article/advantages-using-microwave-energy-process-heating> (accessed 30 November 2017).
- [6] Bobkov Yu.Yu., Gololobov D.V., Kiril'chuk V.B., Kizhlay I.N., Kukharev A.V., Yurtsev O.A. Issledovanie pryamougol'nogo volnovoda i elementov na ego osnove [Study on rectangular waveguide and parts based on it]. Minsk, BSUIR publ., 2012, 46 p.
- [7] Volna H_{10} v pryamougol'nom volnovode [H_{10} wave in rectangular waveguide]. Available at: http://mikpres.ucoz.ru/_ld/0/7___1.pdf (accessed 30 November 2017).
- [8] Elektroprovodnost' metallov: tablitsa i raschety [Metals conductivity: table and calculations]. Available at: <http://specural.com/articles/5/elektroprovodnost-metallov-tablica-i-raschety.html> (accessed 30 November 2017).

- [9] Golubeva N.S., Mitrokhin V.N. Osnovy radioelektroniki sverkhvysokikh chastot [Fundamentals of UHF radio electronics]. Moscow, Bauman Press, 2008, 486 p.
- [10] Gorelov V.V. Ustroystvo snizheniya otrazheniy ot provodyashchey poverkhnosti [Device for decreasing number of reflections from conducting surface]. Patent 2342747 RF. Appl. 18.05.2007, publ. 27.12.2008.

Gorelova A.V. — student, Department of Biomedical Engineering Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.