

DOI: 10.6084/m9.figshare.9783203

УДК 351.74

Манько Александр Алексеевич

Доктор технических наук, профессор

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова, Одесса***Скубак Александр Николаевич**

Кандидат технических наук, доцент, доцент Учебно-научного института информационной безопасности

*Национальная академия Службы Безопасности Украины, Киев***Твердохлеб Николай Григорьевич**

Кандидат технических наук, профессор кафедры телекоммуникационных систем и сетей

*Государственный университет телекоммуникаций, Киев***Харлай Людмила Алексеевна**

Кандидат технических наук

*Киевский колледж связи, Киев***ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МЕЛКОСТРУКТУРНОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ**

Аннотация. Рассмотрена широкополосная лампа бегущей волны, которая используется в радиоэлектронных устройствах для усиления электромагнитных колебаний сверхвысоких частот. Замедляющая система – один из основных узлов, который состоит из продольной молибденовой спирали, закрепленной в тонкостенном металлическом баллоне с помощью керамических стержней. Мощность широкополосных ламп бегущей волны ограничивается тепловой устойчивостью замедляющей системы. Предложено решение, которое позволяет оптимизировать конфигурацию и размеры элементов замедляющей системы и повысить за счет этого ее тепловую устойчивость.

Ключевые слова: лампа бегущей волны; электродинамическая структура; переходное устройство; волновод; спиральная замедляющая система; спираль; диэлектрические опоры; температурный режим; надежность

Введение

Лампа бегущей волны (ЛБВ) представляет собой прибор, действие которого базируется на взаимодействии бегущей электромагнитной волны, возбуждаемой в ЗС, и электронного потока, которые движутся в одном направлении. ЛБВ используют в радиоэлектронных устройствах главным образом для усиления электромагнитных колебаний сверхвысоких частот (СВЧ). ЛБВ состоит из электронной пушки, замедляющей системы, фокусирующей системы и коллектора. Электронная пушка создает поток электронов, замедляющая система обеспечивает взаимодействие сигнала СВЧ с потоком электронов, фокусирующая система формирует электроны в поток и удерживает в пролетном канале ЗС, коллектор принимает отработанные электроны.

Мощность широкополосных ЛБВ ограничивается тепловой устойчивостью замедляющей системы (ЗС). ЗС представляет собой продольную спираль, которая крепится в тонкостенном металлическом вакуумном баллоне с помощью опорных диэлектрических стержней

круглого или трапециевидального поперечного сечения. Создание мощных спиральных ЛБВ коротковолновой части диапазона представляет собой сложную конструкторско-технологическую задачу, связанную с перегревом спирали ЗС во время работы. Спираль нагревается, главным образом, за счет оседания на нее части электронов электронного потока. Повышение тепловой устойчивости ЗС достигается путем усовершенствования тепловых контактов между спиралью, опорными стержнями и баллоном, улучшения теплопроводности этих элементов и снижения токооседания на спираль.

Для монтажа ЗС часто используется метод триангуляции [1; 2]. Согласно этого метода баллон, который представляет собой упругую цилиндрическую оболочку, сжимается системой из трех сил, направленных радиально. В промежутках между линиями приложения сил диаметр баллона, который в недеформированном состоянии несколько меньше диаметра пакета (спираль с тремя опорными стержнями), увеличивается, что позволяет с зазором ввести пакет в баллон. После снятия действия внешних сил баллон за счет упругих усилий сжимает спираль между стержнями. Под действием этих

усилий оболочка и спираль теряют свою круговую форму (рис. 1). В результате диаметр пролётного канала (т. е. диаметр, ограничивающий электронный пучок) уменьшается. Он становится равен окружности, касающейся вогнутостей витков. Это увеличивает токооседание на спираль из-за её приближения к пучку и нагревание спирали. Спираль прогибается до состояния, когда усилия противодействия спирали уравниваются с усилиями, создаваемыми баллоном.

Величины упругих деформаций спирали и баллона в собранной ЗС зависят от жесткости этих элементов. Чем больше, например, жесткость спирали, тем больше усилия сжатия. При этом спираль меньше прогибается, равновесие наступает при большей конечной упругой деформации баллона, и наоборот.

В реальных конструкциях ЛБВ коротковолновой части диапазона спирали уступают по жесткости баллону, т. к. толщина витков спирали ограничена. Важным параметром является средний диаметр спирали. В упругодеформированной спирали средний диаметр спирали ориентировочно равен полусумме диаметров выпуклостей $d_{вып}$ и вогнутостей $d_{вогн}$ спирали (рис. 1). Толщина витков спирали t_2 равна полуразнице этих диаметров за вычетом величины упругого прогиба δ . Очевидно, что при круглом сечении спирали толщина витка была бы больше на величину упругого прогиба δ .

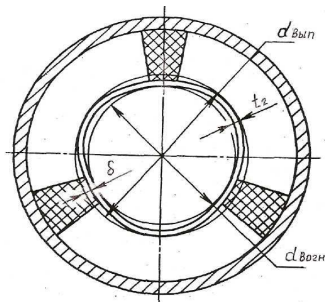


Рисунок 1 – Поперечное сечение замедляющей системы

Изложение основного материала

В работе приведены результаты экспериментальных исследований, на основании которых предложено решение, позволяющее получить близкую к круглой форму сечения спирали и баллона в ЗС, собираемой методом триангуляции. Это достигается путём предварительной пластической деформации спирали и баллона тремя радиальными силами, распределёнными вдоль осей этих элементов [3]. При сборке ЗС опорные стержни располагают на выпуклостях спирали, баллон упруго деформируют радиальными усилиями, действующими на выпуклости баллона, до заданного увеличения диаметра в промежутках между силами,

вводят пакет в баллон и снимают деформирующие усилия. Как и в традиционном способе, закрепление ЗС в баллоне обеспечивается усилиями, создаваемыми упругодеформированным баллоном после снятия внешних сил.

Жесткость элементов ЗС можно оценивать по величине прогиба этих элементов под действием радиальных сил одинаковой величины. Для оценки жесткости удобно применять две силы в диаметрально противоположных точках сечения спирали или оболочки [2]. Силы могут создаваться с помощью груза. Отношение K величин радиальных упругих прогибов баллона и спирали является величиной безразмерной, не зависит от количества сил, если они расположены равномерно по сечению, и определяет отношение жесткостей спирали и баллона. При $K = 1$ величины упругих деформаций спирали и баллона в собранной ЗС одинаковы.

На практике по конструктивным и технологическим причинам коэффициент K часто оказывается отличным от единицы. В таких случаях величины деформаций спирали и баллона различны. Для получения положительного эффекта согласно разработанного способа необходимо, чтобы предварительная пластическая деформация спирали δ_c могла компенсировать прогиб спирали при сборке ЗС, т. е. чтобы в собранной ЗС форма поперечного сечения спирали приближалась к окружности. Это достигается, если значения δ_c удовлетворяют эмпирически полученному неравенству

$$0,6 \frac{\delta_n}{K + 1} \leq \delta_c \leq 1,2 \frac{\delta_n}{K + 1}, \text{ или в другой записи}$$

$$0,6 \leq \frac{\delta_c}{\delta_n / K + 1} \leq 1,2,$$

где δ_n – величина натяга в ЗС (т. е. разница между диаметром пакета и внутренним диаметром баллона до сборки ЗС), мм.

За пределами этого диапазона значений δ_c положительный результат мало ощутим.

Пластически деформированную спираль вводят в баллон таким образом, чтобы выпуклости были расположены под опорными стержнями. Сборочный зазор (т. е. зазор, позволяющий ввести пакет спираль-опорные стержни в баллон), а также натяг (разница диаметров пакет-спираль и баллона) могут оставаться такими же, как и при использовании исходной круглой спирали. Под воздействием усилий прижатия стержней, создаваемых упругодеформированным баллоном, спираль прогибается внутрь в тех местах, где были выпуклости, а точки, ранее расположенные во впадинах, удаляются от оси. В результате спираль

выравнивается и приобретает форму, близкую к окружности, находясь в то же время в упругодеформированном состоянии (рис. 2). При этом усилие прижатия витков спирали к опорам оказывается больше. Этому способствуют одновременно несколько факторов: более благоприятная форма поперечного сечения спирали, увеличение толщины витков при том же среднем диаметре спирали, что и в традиционном способе, механическая нагартовка в результате предварительной пластической деформации.

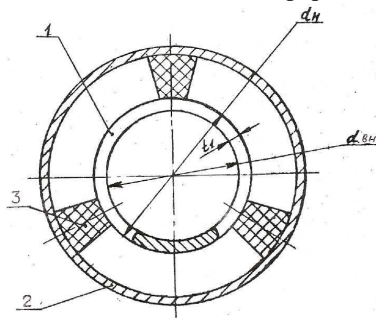


Рисунок 2 – Поперечное сечение ЗС, изготовленной с использованием предложенного решения: 1 – спираль; 2 – баллон; 3 – опорные диэлектрические стержни трапециевидального сечения со скругленным большим основанием трапеции

Экспериментально установлено, что для упругой деформации тонкостенного кольца, имеющего некруглую форму, требуется больше усилия, чем для кольца круглой формы, если деформирующие радиальные усилия действуют на выпуклости. Аналогично кольцу ведут себя витки спирали.

В предложенном решении, где спираль в собранной ЗС может иметь практически круглое поперечное сечение, внутренний и наружный диаметры спирали близки соответственно к диаметрам окружностей, касающейся вогнутостей и описанной вокруг выпуклостей. Таким образом, толщина витков спирали может быть увеличена в сторону внутреннего диаметра спирали приблизительно на величину вогнутостей и наружу на величину выпуклостей.

Если величина предварительной пластической деформации баллона δ_σ находится в пределах

$$0,3\delta_y \leq \delta_\sigma \leq 0,6\delta_y,$$

то при упругой деформации δ_y баллона во время сборки ЗС, позволяющей ввести пакет спираль-опоры в баллон, отклонение радиуса кривизны расположенных между точками приложения сил участков поперечного сечения оболочки (по которым происходит касание к опорным стержням трапециевидального сечения со скругленным большим основанием трапеции) от радиуса кривизны опорных стержней сказывается в несколько раз меньше, чем это наблюдалось в традиционном способе.

В результате, касание опорных стержней к оболочке при вводе пакета в баллон происходит почти по всей поверхности большего основания трапеции поперечного сечения стержней, т.е. в местах наибольшего удаления точек оболочки от средней линии баллона. Это позволяет увеличить натяг в ЗС на 30–40% и улучшить ее теплорассеивающую способность. Практика показывает, что при значениях δ_σ менее $0,3\delta_y$ и более $0,6\delta_y$ влияние предварительной пластической деформации баллона на увеличение натяга и повышение тепловой устойчивости ЗС становится малоощутимым.

Установленная закономерность поясняется следующим образом. Чем больше величина упругой деформации баллона при сборке ЗС, тем меньший радиус кривизны имеют выпуклости в промежутках между точками приложения внешних сил и тем большая величина предварительной пластической деформации баллона необходима для компенсации уменьшения радиуса оболочки в районе выпуклостей. Однако при переходе границы $0,6\delta_y$, компенсация становится чрезмерной и радиус кривизны выпуклостей в момент ввода пакета оказывается больше радиуса скругления опор, что ухудшает условия сборки.

При использовании разработанного решения диаметр пролетного канала не уменьшается в результате сборки ЗС, как было при использовании известного способа, а увеличивается, что уменьшает токооседание на спираль. Он становится близким к исходному диаметру спирали перед пластической деформацией.

Толщина витков увеличивается примерно на 0,6–1 величины прогиба спирали в собранной системе.

Толщина витка $t_1 = \frac{d_n - d_{вн}}{2}$ или

$$t_1 = \frac{d_{вып} - d_{вогн}}{2}, \text{ так как } d_n = d_{вып}, \quad d_{вн} = d_{вогн}. \text{ С}$$

другой стороны, $\frac{d_{вып} - d_{вогн}}{2} = t_2 + \delta$. Отсюда

$$t_1 = t_2 + \delta.$$

Выводы

Измерения механических свойств спиралей показали, что жесткость витков увеличилась на 20–25% при сохранении среднего диаметра спирали и диаметра пролетного канала, что в сочетании с увеличением натяга позволило существенно увеличить тепловую устойчивость ЗС: при той же рассеиваемой в ЗС мощности рабочая температура спирали снизилась на 100–150 °С по сравнению с традиционным способом, благодаря чему повысились надежность и выход годных ЛБВ.

Список літератури

1. Довженко Н.М., Удосконалення електродинамічної структури активних елементів систем зв'язку / Н.М. Довженко., Г.С Срочинська, М.Г. Твердохліб // Зв'язок. – 2016, № 5. – С. 39 – 42.
2. Предмирский В.С., Метод изготовления высокочастотных диэлектрических опор замедляющих систем лампы бегущей волны / В.С. Предмирский, Н.Г. Твердохлеб // Вісник ДУІКТ. – Том 3 – № 3 – 2005. – С. 161 – 164.
3. Барковский В. В., Предмирский В. С., Скубак А. Н., Твердохлеб Н. Г. и др. Анализ конструкции замедляющей системы закрепляемой упругими силами. Ч.3. Экспериментальное исследование механических элементов замедляющей системы. // СВЧ – техника. Серия 1. – 1992. Вып. 3 (447). – С. 28–32.
4. Предмирский В.С., Твердохлеб Н.Г. Усовершенствование конструкции спиральной замедляющей системы ЛБВ. // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2007. Спеціальний випуск. – С. 56 – 60.
5. Азов Г. А. Хриткин С. А. Моделирование спиральной замедляющей системы мощной лампы бегущей волны. // Радиотехника и электроника, – 2010, том 55. – № 3. – С. 369 – 373.
6. Григорьев А.Д., Иванов В.А., С.И. Молоковский С.И. Микроволновая электроника, под редакцией проф. А.Д. Григорьева. Учебник для вузов РФ. – СПб.: Изд-во «Лань», 2016. – 495 с.
7. Тагер А.С., Солнцев В.А. Исследование дисперсии спиральной линии замедления с диэлектрическими опорами // Радио техника и электроника, 2011. – т. 56. – № 4. – С. 389 – 398.
8. Пирс Дж. Лампа с бегущей волной. Пер. с англ. под ред. В.Т. Овчарова. – М.: Сов. радио, 1952. – 232 с.
9. Мухин С.В., Солнцев В.А., Пределные случаи расширения полосы пропускания ЗС // Изв. ВУЗов, сер. Радиоэлектроника 1990. №10. – С.35–38.
10. Григорьев А.Д., Янкевич В.Б. Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ: Численные методы расчета и проектирования. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.

Статья поступила в редколлегию 18.01.2019

Манько Олександр Олексійович

Доктор технічних наук, професор

Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, Одеса

Скубак Олександр Миколайович

Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Навчально-наукового інституту інформаційної безпеки

Національна академія Служби безпеки України, Київ

Твердохліб Микола Григорович

Кандидат технічних наук, професор кафедри телекомунікаційних систем та мереж

Державний університет телекомунікацій, Київ

Харлай Людмила Олексіївна

Кандидат технічних наук

Київський коледж зв'язку, Київ

ПІДВИЩЕННЯ ТЕПЛОВОЇ СТІЙКОСТІ ДРІБНОСТРУКТУРНОЇ СПОВІЛЬНЮЮЧОЇ СИСТЕМИ ШИРОКОСМУГОВОЇ ЛАМПИ БІЖУЧОЇ ХВИЛІ

Анотація. Розглянуто широкосмугову лампу біжучої хвилі, яка використовується в радіоелектронних пристроях для посилення електромагнітних коливань надвисоких частот. Уповільнююча система – один з основних вузлів, що складається з поздовжньої молибденової спіралі, закріпленої в тонкостінному металевому балоні за допомогою керамічних стрижнів. Потужність широкосмугових ламп біжучої хвилі обмежується тепловою стійкістю сповільнюючої системи. Запропоновано рішення, яке дає змогу оптимізувати конфігурацію і розміри елементів сповільнюючої системи і підвищити за рахунок цього її теплову стійкість.

Ключові слова: лампа рухомої хвилі; електродинамічна структура; перехідний пристрій; хвилевід; спіральна сповільнювальна система; спіраль; діелектричні опори; температурний режим; надійність

Manko Alexander Alexeyevich

DSc (Eng.), Professor of Odessa National Academy of Telecommunications named O.S. Popov
Odessa National Academy of Telecommunications named O.S. Popov, Odessa

Skubak Alexander Nikolaevich

PhD (Eng.) Associate Professor, Associate Professor of the Educational and Scientific Institute of Information Security
National Academy of Security Service of Ukraine, Kyiv

Tverdokhlebo Nikolay Grigorievich

PhD, Professor of the Department of Telecommunication Systems and Networks,
State University of Telecommunications, Kyiv

Kharlai Liudmila Alekseevna

PhD

Kyiv College of Communication, Kyiv

IMPROVING THE HEAT STABILITY OF A SMALL-STRUCTURED SLOWING SYSTEM FOR A BROADBAND TRAVELING WAVE TUBE

Abstract. *In this paper, a broadband traveling-wave tube is considered. Traveling-wave tubes are used in electronic devices to amplify electromagnetic oscillations at ultrahigh frequencies. The slowing system - one of the main assemblies consists of a longitudinal molybdenum spiral fixed in a thin-walled metal can with the help of ceramic rods. The power of broadband traveling-wave tubes is limited by the thermal stability of the slowing system. The paper proposes a solution that allows you to optimize the configuration and size of the elements of the slowing system and thereby increase the thermal stability of the slowing system.*

Keywords: *lump moving waves; electrodynamic structure; transition device; waveguide; slowing spiral system; spiral; dielectric resistance; temperature routine; reliability*

References

1. Dovzhenko, N.M., Srochinskaya, G.S., Tverdokhlebo, M.G. (2016). Improvement of electrodynamic structure of active elements of communication systems. *Zvyazok*, 5, 39–42. (in Ukrainian)
2. Predmirsky, V.S., Tverdokhlebo, N.G. (2005). The method of manufacturing high-frequency dielectric supports slowing systems traveling wave tubes. *Herald of DUKIT*, 3, 3, 161–164. (in Russian)
3. Barkovsky, V.V., Predmirsky, V.S., Skubak, A.N., Tverdokhlebo, N.G., et al. (1992). Analysis of the design of a slowing system fixed by elastic forces. Part 3. Experimental study of the mechanical elements of the retarding system. *Microwave – technique. Series 1*, 3 (447), 28–32. (in Russian)
4. Predmirsky, V.S., Tverdokhlebo, N.G. (2007). Improvement of the design of the spiral retarding TWT system. *Bulletin of the State University of Information and Communication Technologies, Special edition*, 56–60. (in Russian)
5. Azov, G.A., A. Khrutkin, A. (2010). Modeling of the spiral slowing system of a powerful traveling-wave tube. *Radio Engineering and Electronics*, 55, 3, 369–373. (in Russian)
6. Grigoriev, A.D., Ivanov, V.A., Molokovsky, S.I. (2016). *Microwave electronics. Edited by prof. A.D. Grigoriev. Textbook for universities. SPb.: Publishing house "Lan", 495. (in Russian)*
7. Tager, A.S., Solntsev, V.A. (2011). Investigation of the dispersion of the spiral line with dielectric supports. *Radio engineering and electronics*, 56, 4, 389–398. (in Russian)
8. Pierce, D. (1952). *The lamp with a traveling wave. Translation from English under the editorship of V.T. Ovcharov. M., Sov. Radio*, 232. (in Russian)
9. Mukhin, S.V., Solntsev, V.A. (1990). Limiting Cases of Enlargement of the Transmission Bandwidth of the RS, *News of universities series Radio electronics*, 10, 35-38. (in Russian)
10. Grigoriev, A.D. Yankevich, V.B. (1984). *Resonators and resonator slowing microwave systems of VHF: Numerical calculation and design methods. M.: Radio and communication*, 248. (in Russian)

Ссылка на публикацию

APA Manko, Olexandr, Skubak, Olexandr, Tverdokhlebo, Nikolay & Kharlai, Liudmila, (2019). Improving the heat stability of smal-structured slowing system for a broadband traveling wave tube. *Management of Development of Complex Systems*, 83 – 87, [dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.9783203](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.9783203).

ГОСТ Манько А.А. Повышение тепловой устойчивости мелкоструктурной замедляющей системы широкополосной лампы бегущей волны [Текст] / А.А. Манько, А.Н. Скубак, Н.Г. Твердохлеб, Л.А. Харлай // *Управление развитием сложных систем.* – 2019. - № 37. – С. 83 – 87, [dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.9783203](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.9783203).