

УДК 621.318.2

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПАРАМЕТРАМ МАГНИТНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ФОКУСИРУЮЩИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЛБВ С МАЛЫМ ДИАМЕТРОМ ПРОЛЕТНОГО КАНАЛА

И. Н. Афонин, А. Ю. Кивокурцев, А. М. Самылкин

Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз»,
410033, Саратов, ул. Панфилова, д. 1

Статья поступила в редакцию 26 апреля 2019 г.

Аннотация. В данной статье авторы рассматривают новый метод настройки магнитной периодической фокусирующей системы (МПФС) для лампы бегущей волны (ЛБВ) космического назначения. В статье дан подробный анализ существующих методов настройки МПФС и ЛБВ. Авторы указывают на недостатки существующих методов настройки МПФС и предлагают варианты их устранения. В статье рассматривается возможность применения особых требований к поперечному магнитному полю МПФС и новая методика настройки ЛБВ. В заключение авторы демонстрируют результаты практического эксперимента.

Ключевые слова: магнитная, постоянные магниты, магнитная индукция, фокусирующая система, ЛБВ, электронный поток.

Abstract. In this article, the authors consider methods for adjusting the magnetic periodic focusing system (MPFS) for traveling wave tubes (TWTs) for space applications. The article provides a brief analysis of the existing methods of MPFS and TWT analysis and adjustment. The method of correlation analysis for tuning the magnetic system and the classical tuning methods are considered. The authors point out the shortcomings of the existing methods of setting up the MPFS and suggest options for their elimination. The article considers the possibility of applying special requirements to the transverse magnetic field of the MPFS. Special requirements can be of two kinds. The first is the introduction of a requirement for the maximum and minimum level of the transverse component of magnetic induction on the axis of the magnetic system. The second is the introduction

of a requirement for the allowable difference between the values of the transverse component of the magnetic induction of neighboring magnetic cells. In this case, it becomes possible to compensate for the defocusing effect on the electron flux of the transverse magnetic field in neighboring magnetic cells by finding their optimal azimuthal interposition. This technique can be used to adjust the millimeter-wave TWT, where problems are exacerbated by the miniature size of the retarding system. The authors demonstrate the results of a practical experiment - to set up the MPFS using the new method requires, on average, 3 times less time and 10 times less shunt elements.

Keywords: magnetic permanent magnets, magnetic induction, focusing system, TWT, electron beam.

Одной из важнейших задач, которые стоят перед разработчиком ламп бегущей волны (ЛБВ), является фокусировка электронного потока. Практически ко всем современным приборам предъявляется требование минимального токооседания, либо максимального токопрохождения (по сути, оба этих параметра выражают одно явление). От данных параметров напрямую зависят рабочие характеристики прибора, при этом они особенно важны в разработке ЛБВ с малым диаметром пролетного канала, где даже минимальный угол отклонения оси электронного потока от оси прибора приводит к существенному возрастанию токооседания в замедляющей системе.

В формируемом ЛБВ электронном потоке сила взаимного расталкивания электронов оказывает сильное дефокусирующее воздействие. Эту проблему традиционно решают при помощи фокусирующих сил, равных и противоположно направленных силам пространственного заряда. В качестве источника этой силы обычно выступает магнитное поле, направленное вдоль оси прибора. Генерация магнитного поля осуществляется, преимущественно, двумя методами – соленоидом с источником питания, либо магнитной фокусирующей системой на постоянных магнитах. На сегодняшний день наибольшее распространение получили магнитные периодические

фокусирующие системы (МПФС) на постоянных самарий-кобальтовых (SmCo) магнитах.

Формирование электронного пучка осуществляется за счет влияния на него магнитных сил, направленных вдоль оси замедляющей системы. Однако, ввиду сложности структуры магнитного поля, а также его неоднородности (возникающей по многим причинам, в числе которых неоднородность структуры самих магнитов) в его состав входит и, так называемая, поперечная составляющая магнитной индукции (B_{\perp}), которая является дефокусирующим фактором и вносит существенные коррективы в траекторию полета электронного пучка.

Основным методом устранения дефокусирующих составляющих магнитного поля на сегодняшний день является контроль отдельных магнитов, входящих в состав магнитных систем, с целью выявления и устранения тех из них, у которых величина поперечной составляющей магнитной индукции в центре на оси магнитной ячейки превышает определенную величину (в современных ЛБВ космического назначения принято считать таким пределом величину, равную 0,5 % от амплитудной величины продольной составляющей магнитной индукции данного магнита в составе МПФС) [1].

Также, на стадии юстировки прибора, настройщик добивается максимального токопрохождения методом вращения магнитов относительно друг друга с целью компенсации воздействия на электронный пучок B_{\perp} одного магнита воздействием на электронный пучок B_{\perp} другого, а также устанавливая на магнитную систему шунтирующие элементы (магниты, либо пластины из магнитомягкого материала). Эти элементы вносят коррективы в распределение величины магнитного поля на оси прибора, уменьшая влияние дефокусирующих факторов, т.е. компенсируя влияние поперечных в смежных ячейках.

Картина распределения азимутальной составляющей магнитной индукции кольцевого аксиально намагниченного магнита представлена на рис. 1. Для удобства восприятия графики дублированы в двух системах координат –

декартовой и полярной.

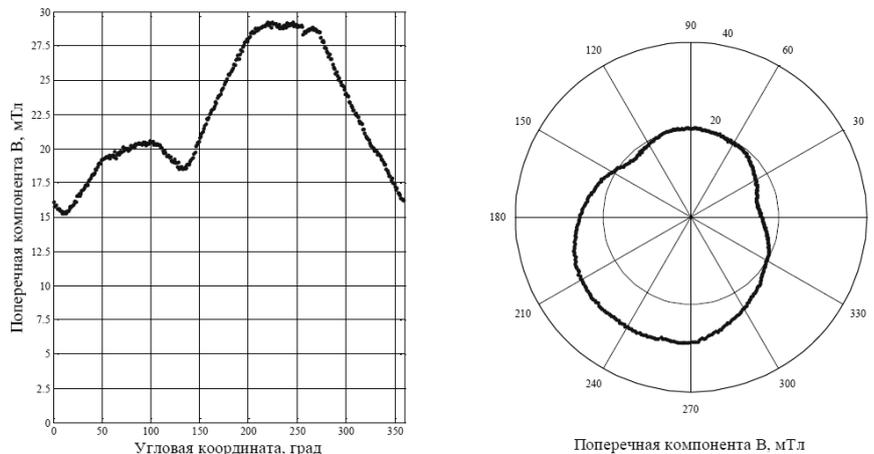


Рис. 1. Азимутальное распределение магнитной индукции, измеренное в центре на оси кольцевого аксиально намагниченного магнита.

По рисункам можно судить о степени неравномерности поперечной составляющей магнитной индукции, а также дать количественную оценку её изменения при вращении магнита относительно датчика. Построение результатов в полярной системе координат позволяет судить о степени смещения магнитной оси системы от оси геометрической. [4]

Смещение и наклон магнитной оси МПФС относительно геометрической оси влияет на качество фокусировки электронного пучка. Заряженные частицы, проходя сквозь магнитное поле, получают различные компоненты силы, что может быть одной из причин флуктуаций облака пространственного заряда [5].

Представленные картины распределения магнитного поля позволяют выявить проблемные места, произвести либо замену не подходящего магнита, либо выполнить его подстройку путем добавления корректирующих шунтов.

Обе перечисленные операции имеют как преимущества, так и недостатки. К преимуществам, безусловно, стоит отнести их несомненную итоговую эффективность. В качестве недостатков же стоит указать, во-первых, большой процент бракуемых магнитов по одному лишь параметру величины поперечной составляющей магнитной индукции на стадии изготовления магнитной системы, во-вторых – настройка прибора по параметру токопрохождения

методом шунтирования магнитного поля часто приводит к тому, что слой (нередко, даже не один слой) шунтирующих элементов существенно увеличивает массу прибора и по весу сопоставим с массой самой магнитной системы. К тому же, настройка данным методом является весьма трудоемкой операцией и требует большого опыта от выполняющего ее специалиста.

В [4] приводится методика корректировки магнитного поля МПФС путем выявления участков с неоднородностью магнитного поля методом корреляционного анализа и последующей заменой магнитов с этого участка, либо установкой шунтирующих элементов. Данный метод позволяет с достаточно высокой точностью проводить настройку МПФС, но, также, имеет и ряд недостатков (также указанных в [4]). В число последних следует отнести, во-первых, необходимость разметки магнитной системы на этапе ее настройки для сохранения конфигурации магнитного поля при сборке на прибор (что является трудновыполнимой задачей, ввиду сложного характера картины размещения шунтов на МПФС); во-вторых, невозможность применения данного метода на МПФС, уже установленной на приборе с тем, чтобы были учтены индивидуальные особенности конкретного прибора (фактические размеры, дефекты монтажа, несоосности расположения элементов и др.); в-третьих, необходимость использования сложной измерительной установки.

Как уже упоминалось выше, к современным магнитным системам предъявляется требование по допустимому уровню величины поперечной составляющей магнитной индукции, который, обычно, не превышает 0,5% от амплитудной величины продольной составляющей магнитного поля. При этом никак не ограничивается минимальный допустимый уровень данной величины, что приводит к тому, что в магнитной системе в соседних магнитных ячейках может возникнуть разница в уровне величины поперечной составляющей магнитной индукции в несколько раз, или даже десятки раз. Это приводит к возникновению больших сложностей на этапе юстировки прибора – невозможно добиться приемлемой величины токопрохождения методом вращения магнитов относительно друг друга, т.к. невозможно компенсировать

большую величину поперечной составляющей магнитной индукции одной ячейки малой величиной соседней. На дальнейшем этапе юстировки (методом шунтирования) также возникают сложности, т.к., обычно, приходится применять большое количество шунтирующих элементов, которые так же влияют и на продольную составляющую магнитного поля. В результате происходит лавинообразный процесс, при котором, компенсируя поперечную составляющую магнитной индукции, мы изменяем продольную, которая изменяет геометрию пучка.

При переходе в миллиметровый диапазон рабочих частот, проблемы усугубляются миниатюрными размерами ВЧ-пакета и замедляющей системы в целом.

Выходом из сложившейся ситуации служит введение дополнительного условия по уровню поперечной составляющей магнитной индукции. Данным условием является либо введение помимо верхней границы уровня $V_{\text{п}}$ еще и нижней границы $V_{\text{п}}$, либо введение требования на допустимую разницу в уровне $V_{\text{п}}$ между соседними ячейками. При этом появляется возможность компенсации дефокусирующего воздействия на электронный поток $V_{\text{п}}$ в соседних магнитных ячейках методом нахождения их оптимального азимутального взаиморасположения.

Предлагаемый метод лишен недостатков метода из [4], так как, во-первых, отсутствует необходимость в копировании точного расположения магнитов из состояния настроенной МС в состояние собранной на приборе МС; во-вторых, все измерения проводятся на стадии сборки и настройки магнитной системы, что исключает необходимость проведения трудновыполнимых измерений магнитных параметров магнитной системы в составе прибора (зачастую данные измерения провести вообще невозможно, ввиду отсутствия прямого доступа к магнитной системе); в-третьих, осуществление измерений по данной методике предполагает использование классической измерительной аппаратуры (тесламетр и т.п.) со специализированной оснасткой, изготовление которой не представляет какой-либо сложности.

К недостаткам указанного метода следует отнести увеличение трудоемкости выполнения операции сборки и настройки МС. Тем не менее, это увеличение незначительно на фоне общего снижения трудоемкости изготовления и настройки прибора.

Для апробации предложенного метода было проведено экспериментальное опробование на ряде приборов с магнитными системами с диаметром канала 0,7 мм, периодом 6 мм, и количеством магнитов, равном 54 штукам. В конструкции данных ЛБВ, работающих в диапазоне частот 18-40 ГГц с выходной непрерывной мощностью 40 Вт [2, 3].

На первом этапе проводилась настройка прибора по токопрохождению с магнитной системой, настроенной без учета требования по максимальной допустимой разнице в уровне V_{π} .

На втором этапе на приборы устанавливались соответствующие им по первому этапу магнитные системы, перенастроенные уже с учетом требования по максимальной допустимой разнице в уровне V_{π} . Для сравнения внешний вид ЛБВ представлен на рис. 2 и рис. 3.



Рис. 2. Внешний вид настроенной магнитной системы до введения требования на контроль V_{π} (система залита зеленым компаудом, под слоем которого видны магнитные шунты).

Результаты эксперимента, проведенного на ряде СВЧ приборов, представлены в виде сводной таблицы (таб. 1) средних значений основных параметров, дающих наглядное представление об изменении основных контролируемых параметрах ЛБВ в зависимости от типа применяемой МПФС –

настроенной по действующему способу и настроенной по способу, предлагаемому в данной работе.

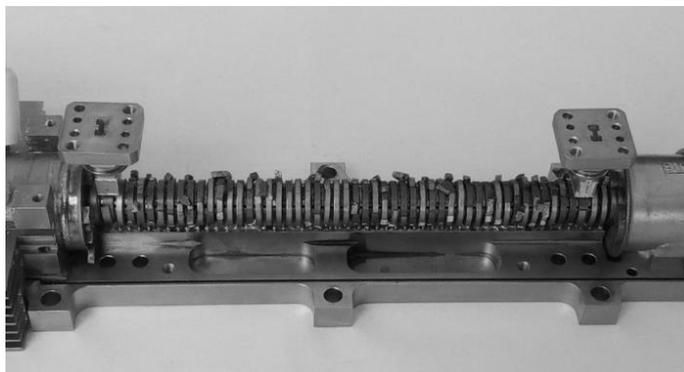


Рис.3. Внешний вид настроенной магнитной системы после введения требования на контроль разности V_{II} .

Таблица 1 – Средние значения параметров настройки приборов №№1-7

	Длительность настройки, ч.	Количество шунтирующих элементов, шт.	Токопрохождение в статическом режиме, %	Токопрохождение в динамическом режиме, %
МПФС, настроенная по действующему способу	124	146	98,3	97,8
МПФС, настроенная по предлагаемому способу	40	16	99,4	99,0

Средние относительные значения основных контролируемых параметров приборов в случае его настройки с МПФС, изготовленной по действующему способу и МПФС, изготовленной по предлагаемому способу представлены в виде гистограммы (рис. 4), дающей наглядное графическое представление о преимуществах предлагаемого способа.

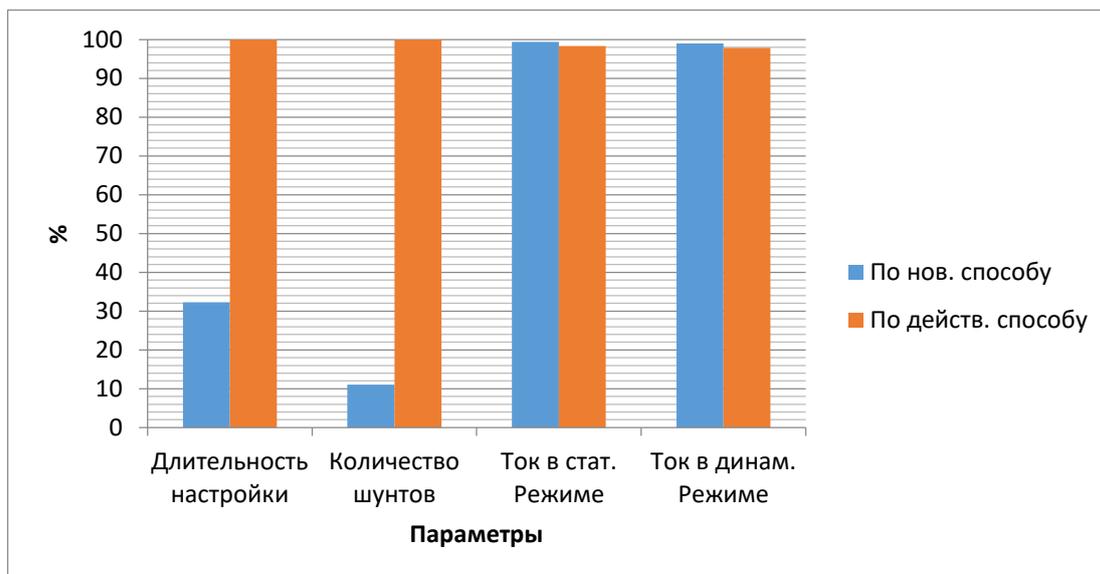


Рис. 4. Гистограмма средних относительных значений основных параметров настройки приборов.

Опробование магнитных систем, изготовленных с учетом требования по максимальной допустимой разнице в уровне V_{Π} между соседними ячейками в 2 раза, позволило значительно упростить и ускорить этап настройки прибора по токопрохождению. Больших значений токопрохождения удалось добиться одним только методом вращения магнитов друг относительно друга. Введение данного требования также позволило в значительной мере снизить количество шунтирующих элементов, изготавливаемых из дорогостоящего материала и, следовательно, снизить цену и, что не менее важно, массу прибора.

Увеличение значения токопрохождения приборов выражено слабо – в пределах, приблизительно, 1%, но, тем не менее, тенденция к увеличению данного параметра прослеживается на каждом из приборов, на которых проводились испытания.

Исходя из вышесказанного можно сделать заключение, что, не смотря на слабую корреляцию в данных эксперимента по параметру токопрохождения и невозможность получения достаточно объективных данных по эксперименту лишь на семи приборах, в дальнейшем, при проведении дополнительных исследований, необходимо обратить внимание на изменение данного параметра

и, получив достаточное количество статистических данных, сделать окончательный вывод по данному вопросу.

Литература

1. Царев В.А. Магнитные фокусирующие системы электровакуумных микроволновых приборов О-типа: учебное пособие // В. А. Царев, Р. В. Спиридонов. Саратов: изд-во «Новый ветер», 2010. 352 с.

2. Шалаев П.Д., Результаты разработки базовой конструкции широкополосной ЛБВ средней мощности мм диапазона /П.Д. Шалаев, В.И. Роговин, Е.М. Ильина, С.О. Семёнов, А.И. Петросян, И.В. Роговин, Л.К. Михеева, А.А. Горская, Д.И. Кириченко, Ю.Н. Щербаков, Д.Л. Симонов/ Материалы научно-технической конференции, посвященной 55-летию АО «НПП «Алмаз», Саратов, 5-7 сентября 2012, с. 3-45.

3. Бушуев Н.А., Шалаев П.Д., Кириченко Д.И. Разработка и исследование конструкций и технологий замедляющих систем для широкополосных ЛБВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн // Радиотехника 2017, №7, с. 24-30.

4. Емельянов Е.А. Разработка методик и средств автоматизированного контроля магнитного поля магнитной периодической фокусирующей системы лампы бегущей волны О-типа: диссертация кандидата технических наук. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, 2015.

5. Цейтлин М.Б. Лампа с бегущей волной / М.Б. Цейтлин, А.М. Кац. М.: Советское радио, 1964. 312 с.

Для цитирования:

И. Н. Афонин, А. Ю. Кивокурцев, А. М. Самылкин. Дополнительные требования к параметрам магнитных периодических фокусирующих систем для ЛБВ с малым диаметром пролетного канала. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 5. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may19/1/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.5.1