
Генерация электромагнитных колебаний

УДК 621.385.64

Магнетрон 3-миллиметрового диапазона длин волн на пространственной гармонике не π -вида колебаний

© Авторы, 2016

© ООО «Издательство «Радиотехника», 2016

Н.И. Скрипкин – начальник лаборатории, ОАО «Плутон» (Москва)

E-mail: n.scripkin@pluton.msk.ru

С.Л. Моругин – д.т.н., доцент, зав. кафедрой, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

E-mail: smorugin@yandex.ru

Создана расчетная модель для определения и оптимизации электродинамической системы магнетрона с управляющими асимметриями в «холодной» системе без электронного потока. Проведен расчет возбуждения некоторых вариантов электродинамических систем в «горячей» системе с учетом электронного потока. На основании расчетов изготовлены и изучены экспериментальные образцы магнетронов. Представлены достигнутые результаты.

Ключевые слова: магнетрон, анодный блок, асимметричные резонаторы, трехмиллиметровый диапазон, электронный поток.

This article is dedicated to the optimization of the design of the magnetron working at a spatial harmonic not « π » – type oscillations. To set the preferred excitation conditions for working harmonic and to stabilize her parameters, applied reactive ways of suppression competing harmonics. Created calculation model, to determine the structure and optimize electrodynamic system magnetron with controlled asymmetries in a «cold» system without the electron beam. Calculation of embodiments of electrodynamic parameters in «hot» system with an electron beam is the basis of made and studied experimental samples magnetrons. Presented achieved results.

Keywords: magnetron, anode block, asymmetric resonators, three-millimeter range, the electronic flow.

За последние, по крайней мере, 15 лет в отечественной и зарубежной литературе опубликовано немало статей и докладов, где обсуждаются вопросы стабилизации параметров магнетронов, работающих в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн [1–7]. Однако в публикациях отсутствует или имеется очень скудная информация о реально разработанных магнетронах и их параметрах, не дающая конкретных результатов. Пассивность разработчиков обусловлена причинами, не позволяющими справиться с технологическими сложностями. На взгляд авторов, одной из главных проблем, с которой сталкиваются разработчики, являются колоссальные трудности при отработке конструктивных вариантов магнетронов по обеспечению микронных допусков в деталях, необходимость которых обусловлена стремлением добиться повторяемости результатов.

Руководствуясь накопленным опытом на предприятии по созданию магнетронов, работающих на пространственной гармонике не π -вида колебаний, авторы пришли к выводу о возможности создания магнетрона с асимметричными резонаторами анодного блока, введенными с целью оптимизации и стабилизации параметров возбуждающихся колебаний. За основу была взята конструкция анодного блока магнетрона МИ-718, разработанного в 2013 г. Для апробирования идей по оптимизации электродинамических характеристик прибора разработана расчетная электродинамическая 3D-модель магнетрона с электронным потоком и в дальнейшем созданы и испытаны экспериментальные образцы.

Цель работы – провести оптимизацию конструкции магнетрона, работающего на пространственной гармонике не « π »-вида колебаний, для стабилизации параметров рабочей пространственной гармоники и создания предпочтительных условий возбуждения на этой гармонике.

Известно, что при внесении хотя бы одной неоднородности (асимметрии) в резонаторную систему магнетрона, которой может являться, например, вывод энергии, вырождение дублетных видов колебаний, характерных для полностью симметричных систем, снимается, и происходит их расщепление на

две составляющие, пространственная структура поля которых имеет устойчивое состояние. При этом одна составляющая на неоднородности имеет ноль поля (ненагруженная), другая максимум поля (нагруженная). Их принято называть «синусная» и «косинусная» составляющие. В такой системе, как известно, «синусная» составляющая имеет нагруженную добротность Q_n , равную собственной Q_0 . «Косинусная» составляющая имеет нагруженную добротность Q_n , существенно меньше Q_0 . Как правило, приборы такого класса работают при критическом уровне связи с нагрузкой или близком к нему, поэтому Q_n выбирается примерно $Q_0/2$.

Практика показывает, что в равнорезонаторной системе магнетрона с неоднородностью в виде одного вывода энергии не удается возбудить нагруженную составляющую дублета, связанную с выводом. Возбуждается, как правило, ненагруженная составляющая, имеющая предпочтительные условия возбуждения, но при этом мощность в нагрузке стремится к нулю. Иногда удавалось возбудить нагруженную составляющую дублета и получить ненулевую мощность в нагрузке, но этот процесс является неуправляемым и обусловлен случайными дополнительными технологическими погрешностями изготовления анодного блока магнетрона, внесенными в анодную замедляющую систему.

Проведенные расчеты и анализ структуры полей рабочей пространственной гармоник, конкурирующих с ней второй составляющей дублета и гармоник соседних видов колебаний позволили определить оптимальное число, величину и места расположения управляющих асимметрий в резонаторной системе магнетрона, место расположения вывода энергии для создания стабильного возбуждения магнетрона при максимальной мощности в нагрузке.

Предложенные асимметрии конструктивно выполнялись в виде укороченных секторных резонаторов анодного блока, либо использовались другие способы введения асимметрии (например, замена на щелевой резонатор). Макеты анодных блоков изготавливались по размерам, полученным в результате электродинамического расчета, с последующей реализацией их в изделиях для сравнительной оценки параметров экспериментальных образцов с расчетными данными.

Основной задачей являлось управление спектральным составом пространственных гармоник с целью достижения необходимой степени разрушения конкурирующих видов колебаний при сохранении симметрии поля рабочей пространственной гармоник за счет введения асимметрии резонатора. Рассматривались варианты асимметричных анодных блоков, в которых пространственный спектр конкурирующих гармоник наибольшим образом «засорен» другими гармониками по сравнению с симметричным анодным блоком при минимальном искажении поля рабочей пространственной гармоник. Расчетным путем было установлено оптимальное число асимметрий (шесть), определенным образом расположенных относительно выбранного начала отсчета, взятого с любого резонатора анодного блока. Далее в такую асимметричную систему помещался вывод энергии в резонаторы с различными по величине амплитудами полей рабочей пространственной гармоник, равными 0,57, 0,7 и 0,82 отн. ед. В предложенных вариантах рассчитывался пространственный спектр видов колебаний «холодной» системы без электронного потока и осцилляционные картины возбуждения резонансной системы магнетрона с электронным потоком.

В [8] проведен анализ возможных способов внесения асимметрии в резонаторную систему, приводятся фрагменты пространственного спектра колебаний рабочей и конкурирующих составляющих дублета для разных комбинаций мест расположения управляющих асимметрий и вывода энергии. Однако там рассматривается «холодная» система без электронного потока и расположение вывода энергии только в максимуме поля для рабочей гармоник.

Результаты расчетов систем с электронным потоком показали, что при таком, как в [8], расположении вывода энергии структура поля имеет неустойчивое состояние, в «горячей» системе происходит деформация пространственного спектра и его смещение относительно выбранного места расположения вывода энергии. Необходимо искать места расположения вывода энергии относительно выбранных управляющих асимметрий с целью получения максимального электронного КПД и создания предпочтительных условий возбуждения рабочей пространственной гармоник.

На рис. 1 и 2 представлены спектр пространственных гармоник и развертка поля по окружности радиусом 99% от радиуса анода в колебательной системе без неоднородностей для видов колебаний $(N/4 - 1)$ и $N/4$, где N – число резонаторов в анодном блоке.

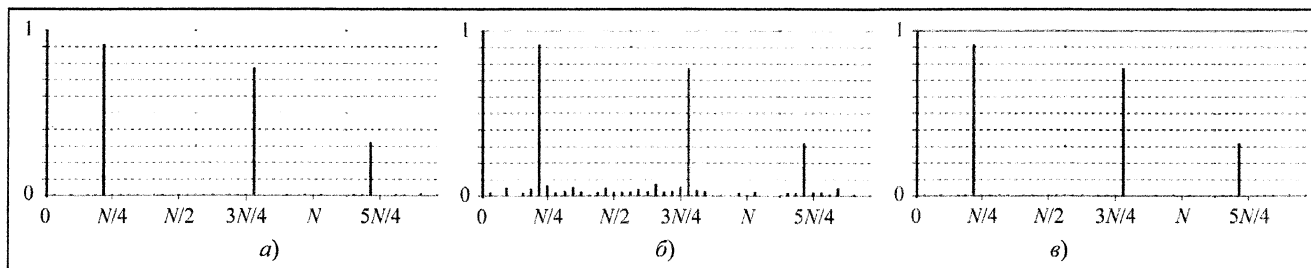


Рис. 1. Спектры пространственных гармоник круговой составляющей электрического поля колебательной системы без неоднородностей для рабочего вида колебаний $N/4 - 1$: а – система без нагрузки (спектр для синусной и косинусной составляющих одинаковый); б – система с нагрузкой (косинусная составляющая); в – система с нагрузкой (синусная составляющая)

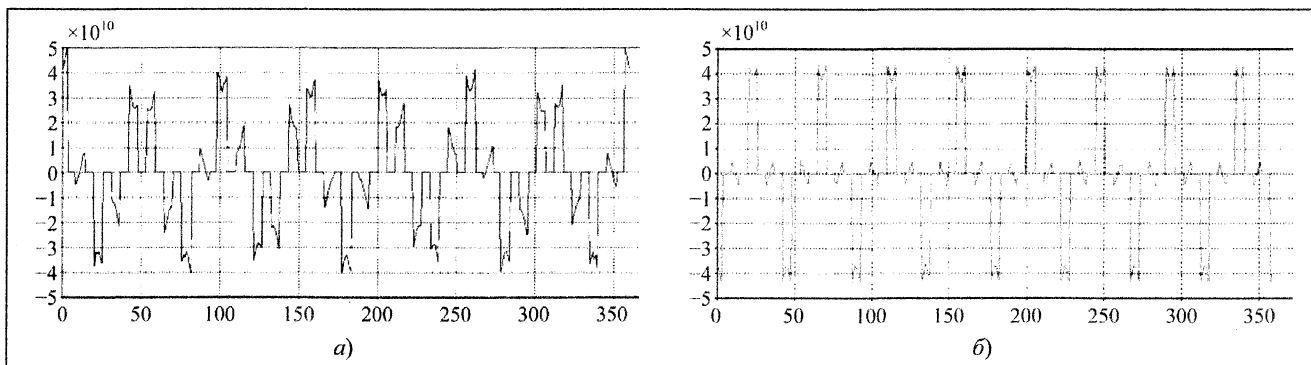


Рис. 2. Развертка на 360° круговой составляющей электрического поля колебательной системы без асимметрии: а – для типа колебаний $N/4 - 1$, система с нагрузкой; б – для типа колебаний $N/4$, система без нагрузки

При введении асимметрии за счет укорочения части резонаторов каждый дублет расщепляется на два вида колебаний: с низшей частотой $(N/4 - 2)^-$, $(N/4 - 1)^-$, $(N/4)^-$, $(N/4 + 1)^-$ и высшей частотой $(N/4 - 2)^+$, $(N/4 - 1)^+$, $(N/4)^+$, $(N/4 + 1)^+$. Асимметрия приводит к появлению побочных составляющих в спектре пространственного распределения электромагнитного поля по окружности анода, величина которых зависит от вида колебаний (табл. 1) и к смещению их резонансных частот. Рабочим видом колебаний выбран вид $(N/4 - 1)^-$, для которого создавались предпочтительные условия возбуждения.

Таблица 1. Влияние асимметрии ненагруженной колебательной системы на смещение частот и разрушение поля соседних мод (рабочая мода $(N/4 - 1)^-$)

Мода	Симметричная система		Асимметричная система		
	Относительная резонансная частота	Уровень максимальной побочной составляющей пространственного спектра, %	Относительная резонансная частота	Уровень максимальной побочной составляющей пространственного спектра, %	Относительный сдвиг частоты, %
$(N/4 - 2)^-$	0,95447	<1	0,96837	13,7	+1,39
$(N/4 - 2)^+$	0,95456	<1	0,97536	43,1	+2,08
$(N/4 - 1)^-$	1	<1	1,00316	6,0	+0,32
$(N/4 - 1)^+$	1,00008	<1	1,02810	68,0	+2,80
$(N/4)^-$	1,03424	<1	1,04631	43,1	+1,21
$(N/4)^+$	1,03455	<1	1,05715	79,2	+2,26
$(N/4 + 1)^-$	1,06024	<1	1,06317	7,0	+0,29
$(N/4 + 1)^+$	1,06031	<1	1,08316	78,3	+2,29

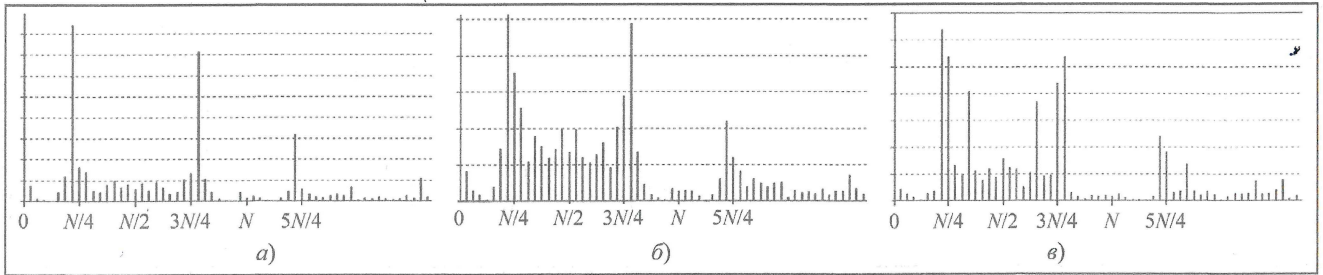


Рис. 3. Спектр пространственных гармоник электрического поля нагруженной колебательной системы с шестью неоднородностями: *a* – для рабочего вида колебаний $(N/4 - 1)^-$; *b* – для конкурирующего вида колебаний $(N/4 - 1)^+$; *в* – для конкурирующего вида колебаний $(N/4)^-$

На рис. 3 и 4 представлен расчетный спектр пространственных гармоник и развертка поля в колебательной системе с оптимально подобранными неоднородностями для видов $(N/4 - 1)^-$, $(N/4 - 1)^+$, $(N/4)^-$.

Появление побочных составляющих в спектре рабочего вида (рис. 3,*a*) обусловлено в основном влиянием неоднородности, вносимой нагрузкой, сама асимметрия резонаторов приводит к меньшему искажению пространственного спектра.

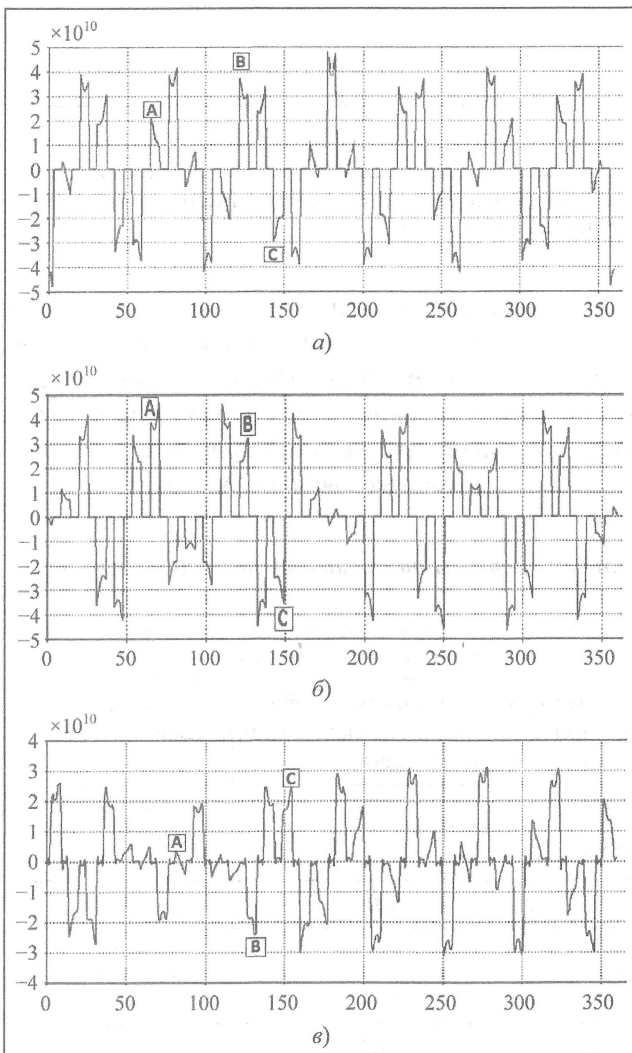


Рис. 4. Развертка на 360° круговой составляющей электрического поля нагруженной колебательной системы с шестью неоднородностями для разных видов колебаний: *a* – $(N/4 - 1)^-$; *b* – $(N/4 - 1)^+$; *в* – $(N/4)^+$

При подключении нагрузки к резонатору *A*, в котором уровень поля рабочего вида колебаний $(N/4 - 1)^-$ составляет 0,57 отн. ед., а уровень поля конкурирующего вида $(N/4 - 1)^+$ составляет 1 отн. ед., создаются предпочтительные условия возбуждения рабочего вида, который отдает в нагрузку меньшую долю энергии колебаний. Аналогично резонатор *A* дает преимущество рабочему виду по отношению к конкурирующему виду $(N/4)^-$.

При подключении нагрузки к резонатору *B*, в котором уровень поля рабочего вида колебаний $(N/4 - 1)^-$ составляет 0,82 отн. ед., а уровень поля конкурирующего вида $(N/4 - 1)^+$ составляет 0,7 отн. ед., создаются предпочтительные условия возбуждения конкурирующего вида.

При подключении нагрузки к резонатору *C*, в котором уровень поля рабочего вида колебаний $(N/4 - 1)^-$, как и вида $(N/4 - 1)^+$, составляют 0,7 отн. ед., рабочий вид не имеет заметного преимущества при возбуждении, и возбуждение возможно за счет лучшей синхронизации поля с электронным потоком при подборе величины магнитного поля в узком диапазоне.

Выбрать резонатор, в котором все ближайшие конкурирующие виды будут иметь более сильную связь с нагрузкой, чем рабочий вид, не представляется возможным. Но введение асимметрии позволяет не только исказить пространственный спектр таких мод (рис. 3,*в*), а и сдвинуть их резонансную частоту на 1...2% вверх (см. табл. 1, виды колебаний $(N/4)^-$ и $(N/4)^+$), что ухудшает для них условия синхронизации.

На рис. 5 показан процесс возбуждения колебаний для разных вариантов расположения вывода энергии в резонаторах *A* или *B* (рис. 4,а) в резонансной системе магнетрона.

Анализируя расчетные осцилляционные картины, убеждаемся, что наиболее широкая область существования устойчивых колебаний по магнитному полю и меньшее время переходного процесса возбуждения рабочей пространственной гармоники достигается в системе с выводом энергии, расположенном в резонаторе *A*, в котором относительная амплитуда поля рабочей гармоники меньше (но не равна нулю), то есть слабее связана с выводом энергии.

Экспериментальная часть

На основе результатов расчета были собраны и испытаны магнетроны с разными вариантами расположения вывода энергии относительно управляющих асимметрий. В табл. 2 приведены значения достигнутых электрических параметров магнетрона, подтверждающие правильность выбранных конструктивных решений. Устойчиво работали магнетроны, в которых вывод энергии помещался в резонатор *A* (с относительной амплитудой поля 0,57), при этом ближайший конкурирующий вид имел амплитуду поля 0,82. Магнетроны с выводами энергии, расположенными в резонаторе *B* с большей амплитудой поля для рабочего вида, «завести» не удалось, что и подтверждалось расчетами. При значениях амплитуд полей на выводе энергии *C* (рис. 4,а) в 0,7 отн. ед. для рабочего и конкурирующего вида, магнетрон возбуждался, но имел существенно меньшую область существования по магнитному полю. Реально замеренные значения нагруженных добротностей Q_n при разных уровнях связи с нагрузкой имели следующие величины: выводу в резонаторе *A* соответствует $Q_n \approx 300$; выводу в резонаторе *B* – $Q_n \approx 200$.

В табл. 2 приведены электрические параметры разработанных магнетронов.

Таблица 2. Электрические параметры магнетронов

Параметр	Медная система	Медно-молибденовая система
Длина волны, мм	3	3
Выходная мощность, кВт	11,5	8,5
Ток анода импульсный, А	10	10
Анодное напряжение, кВ	11,5	11,5
Напряжение накала, В	6,3	6,3
Время готовности, с	60	60
Масса, кг	1,4	1,4
Охлаждение	Воздушное принудительное [9, 10]	Воздушное принудительное [9, 10]
Длительность высокочастотного импульса, мкс	0,2	0,2
Сквжность	1000 или 2000	1000 или 2000

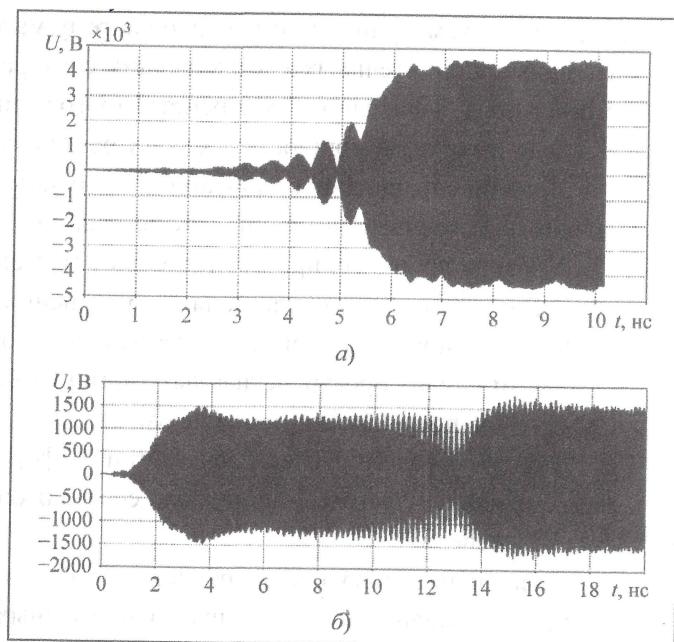


Рис. 5. Временные диаграммы процесса возбуждения колебаний для колебательной системы с шестью неоднородностями и выводом энергии в резонаторе *A* (а) и *B* (б)

- Введение асимметрии в резонансную систему магнетрона приводит для всех видов колебаний к появлению дополнительных составляющих спектра в пространственном распределении электромагнитного поля, к фиксации пространственного расположения поля, что позволяет снять с магнетрона большую выходную мощность, к сдвигу резонансных частот конкурирующих видов колебаний.

Влияние правильно подобранных асимметрий на свойства рабочего вида колебаний минимально, на соседние с ним виды – существенно.

Уровень побочных пространственных гармоник в симметричной ненагруженной системе невелик (менее 1% по амплитуде поля по отношению к основной гармонике) и обусловлен технологическими неоднородностями изготовления анодного блока и погрешностями численного расчета. В идеальном случае пространственных гармоник быть не должно, а практического значения указанный уровень погрешности почти не имеет;

При увеличении степени асимметрии в форме укорочения резонаторов наблюдается возрастающее смещение частоты побочных составляющих вверх. Смещение частоты рабочего вида $(N/4 - 1)^-$ невелико.

Разрушение поля соседних видов $(N/4 - 2)^-$, $(N/4 - 2)^+$, $(N/4 - 1)^+$, $(N/4)^-$, $(N/4)^+$ и др. можно оценить по уровню побочных пространственных гармоник. При сильном укорочении нескольких резонаторов уровень побочных составляющих в пространственном спектре видов достигает десятков процентов от основной составляющей, то есть конкурирующие виды сильно разрушены. Это приводит к тому, что составляющая электрического поля по окружности в некоторых резонаторах меняет фазу на противоположную по сравнению с невозмущенным случаем, что мешает синхронизации вращающихся электронных спиц и поля.

Для получения преимущества при возбуждении рабочего вида желательно, чтобы его уровень связи с нагрузкой был меньше, чем у ближайших конкурирующих видов. Асимметрия резонатора позволяет добиться выполнения этого условия.

Литература

1. Фурсова Е.В., Береснев В.М., Прибыли Д.В. Влияние микронеоднородностей в резонаторных блоках магнетронов на пространственных гармониках на воспроизведение их характеристик. Харьков: Научный физико-технический центр МОН и НАН Украины. 2007.
2. Гурко А.А., Саевский Ф.В., Ерёмка В.Д. О влиянии погрешностей изготовления резонаторной системы на воспроизводимость параметров магнетрона // Материалы 10-й Междунар. Крымской конф. («КрыМиКо 2000») «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь. Сентябрь 2000. С. 203–206.
3. Гурко А.А. Расчет области существования дублетных видов колебаний // Физика и электроника. 1999. Т. 4. № 3. С. 135–137.
4. Гурко А.А. Оценка возможности повышения КПД не π -видных магнетронов миллиметрового диапазона // Радиофизика и радиоастрономия. 2000. Т. 5. № 1. С. 80–83.
5. Моисеенко А.Е., Науменко В.Д., Суворов А.Н., Сыров А.Р. Импульсный 3 мм магнетрон с большим сроком службы // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 8. № 4. С. 421–428.
6. Науменко В.Д., Суворов А.Н. Магнетрон на частоту 95 ГГц с ресурсом долговечности свыше 10000 ч // Материалы 14-й Междунар. Крымской конф. («КрыМиКо 2004») «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии. Украина. Севастополь. Сентябрь 2004.
7. Скрипкин Н.И., Гурко А.А. О возможности создания коаксиальных магнетронов на высших пространственных гармониках в двухмиллиметровом диапазоне длин волн // Радиофизика и электроника. 2007. Т. 12. № 3. С. 576–578.
8. Гурко А.А. Магнетроны миллиметрового диапазона длин волн. М. 2015. 223 с. ISBN 978-5-904463-51-9.
9. Моругин С.Л., Скрипкин Н.И., Шмелев А.В. Магнетрон с воздушным принудительным охлаждением // Датчики и системы. 2015. № 4 (191). Р. 18–22.
10. Скрипкин Н.И., Шмелев А.В., Моругин С.Л. Магнетрон с воздушным принудительным охлаждением с радиатором внутри магнитопровода // Датчики и системы. 2016. № 3 (201). Р. 46–50.

Поступила 10 октября 2016 г.