

Физическая аппаратура

УДК 538

Магнитная система как фактор, влияющий на выбор конструкции сверхмощных магнетронов для мобильных источников СВЧ-мощности

П. И. Акимов, Д. В. Козырев, О. И. Сенатов, Д. А. Терентьев
ФГУП «НПП “Торий”», Москва, Россия

С. В. Сергеев, К. Л. Сергеев
ООО «НПК “Магниты и магнитные системы”», Москва, Россия

Рассмотрены возможные пути конструирования сверхмощных магнетронов с рабочей частотой порядка 1 ГГц, фиксированным рабочим напряжением 50—80 кВ и примерно одинаковой во всех вариантах индукцией магнитного поля в диапазоне порядка 0,1 Тл.

PACS: 84.40.-Jk

Введение

В связи с постановкой в последние годы актуальных задач технологического и специального направления резко возрос спрос на конструкции сверхмощных СВЧ-генераторов дециметрового диапазона длин волн, предназначенных для работы в составе мобильной аппаратуры.

Эффективным решением подобного рода задач может быть создание пакетированных конструкций сверхмощных магнетронов, в которых за счет использования современных достижений по разработке компактных магнитных систем (МС) на постоянных магнитах будут минимизированы весогабаритные параметры приборов.

Вследствие принципиальных ограничений предельной величины плотности тока с катода и напряжения электрического пробоя основным способом повышения выходной мощности магнетрона остается увеличение взаимных размеров анода и катода. При этом для фиксированного рабочего напряжения уровень выходной мощности прибора пропорционален площади катода S , которую можно рассматривать в качестве первого критерия при сравнении между собой различных конструкций приборов.

В процессе выполнения данной работы для ряда возможных вариантов конструктивного исполнения прибора были предложены и рассчитаны варианты конструкций МС на постоянных магнитах. Техническая эффективность рассмотренных вариантов оценивалась по величине отношения веса МС (вместе с полюсными наконечниками и магнитопроводами) к площади катода — P/S (второй критерий для сравнения конструкций).

Конструкции магнетронов

Рассмотрим несколько вариантов конструкций магнетронов, рассчитанных в процессе выполнения данной работы.

Первоначально были проведены оценки возможностей использования традиционных вариантов конструкции магнетрона. Выполненные в рамках данной работы расчеты и моделирование показали, что на конструкции магнетрона с длиной анода $0,6\lambda$ (λ — длина волны в свободном пространстве) и числом резонаторов $N = 8$ можно получить приемлемую величину отношения P/S — порядка $0,13 \text{ кг/см}^2$. Однако при этом площадь катода прибора S_i оказывается явно недостаточной для получения необходимого для проектируемого прибора уровня мощности.

Большую выходную мощность можно получить при использовании принципа предельно-волноводного магнетрона, в котором площадь катода можно многократно увеличить за счет увеличения осевого размера прибора при сохранении величины N неизменной. В этой конструкции можно существенно увеличить поверхность катода ($S \geq 6 \cdot S_i$), но параметр относительного веса P/S принимает столь большие значения, что ее применение полностью исключается. Перспективным представляется использование принципа магнетрона с секционированным анодом. Резонаторная система двухсекционного пакетированного магнетрона состоит из двух одинаковых секций, изолированных одна от другой по высокой частоте. Секции соединены между собой с помощью передающей линии, не имеющей дисперсии.

Двухсекционная конструкция позволяет удвоить число резонаторов до $N = 32$, увеличивая тем

самым площади поверхностей анода и катода в два раза. Продольный размер прибора остается такой же, как у традиционных магнетронов — $\lambda/4$.

Конструкция магнитной системы для данного прибора была рассчитана и оптимизирована с использованием двухмерных программ анализа и позднее промоделирована в трехмерном приближении (рис. 1). Система состоит из внешних и внутренних магнитопроводов и двух кольцевых постоянных магнитов с радиальным намагничиванием. Полярность постоянных магнитов противоположна.

Результаты моделирования распределения магнитного поля в рабочем промежутке прибора с вариантом конструктивного выполнения МС,

представленным на рис. 1, полученные в двух- и трехмерном приближениях, приведены на рис. 2. Результаты моделирования МС с однородным магнитным полем в двух- и трехмерном вариантах показали наличие определенных (незначительных — в пределах 0,5 %) расхождений в полученных кривых распределений продольной составляющей индукции магнитного поля в рабочем промежутке проектируемого прибора.

Детальный анализ показал, что при расчете подобных МС целесообразно применять трехмерное моделирование для уточнения результатов, полученных при двухмерном расчете, особенно в тех случаях, когда намагниченность секторных магнитов имеет не строго радиальное направление.

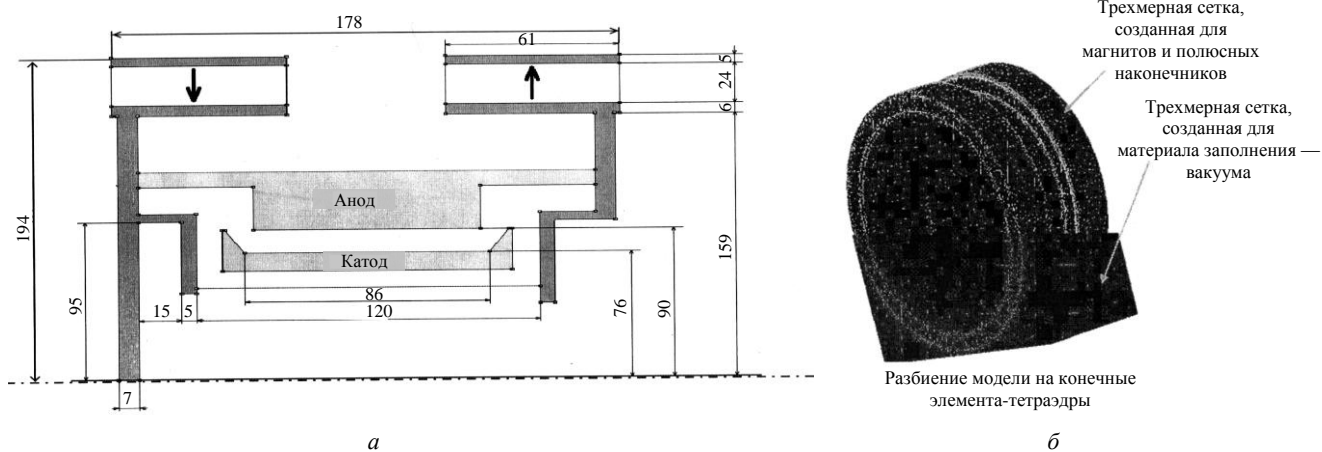


Рис. 1. Магнитная система прибора:

a — геометрия МС двухсекционного магнетрона; *б* — трехмерная расчетная модель спроектированной системы

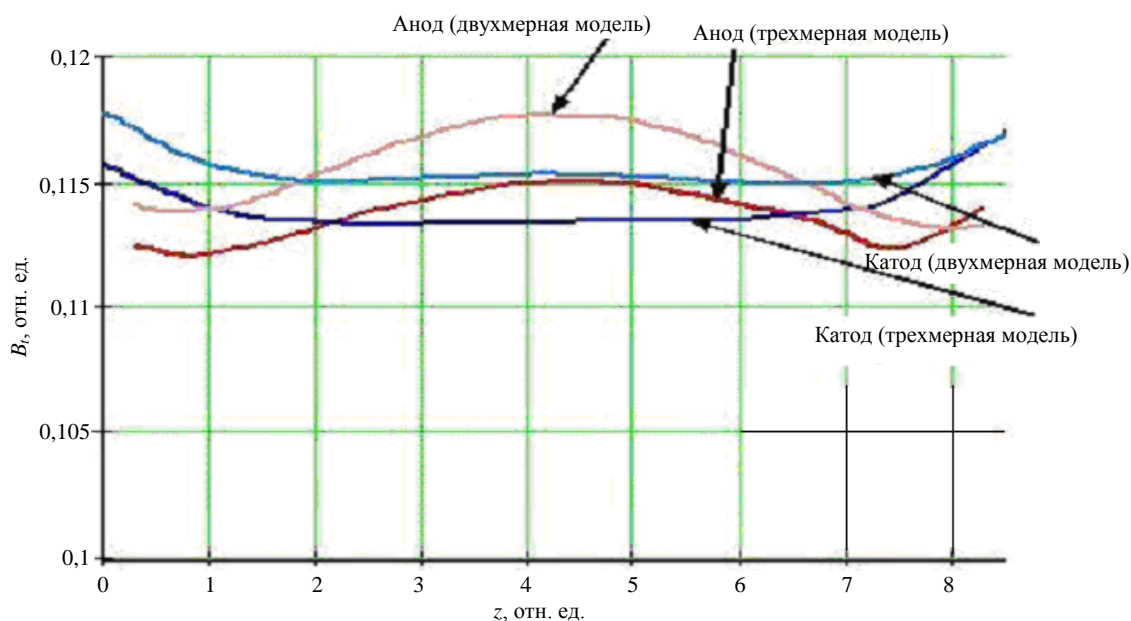


Рис. 2. Результаты расчета распределений продольной составляющей индукции магнитного поля B_z на поверхностях анода и катода магнетрона, полученные в двух- и трехмерном приближениях

Расчет массы основных элементов МС двухсекционного пакетированного магнетрона показал, что на нем могут быть получены очень хорошие значения относительного веса ($P/S = 0,09 \text{ кг/см}^2$), несопоставимые с характеристиками соленоидов. К сожалению, площадь катодной поверхности не отвечает требованиям по необходимой мощности.

В данной работе рассмотрена также конструкция четырехсекционного магнетрона ($N = 40$, длина анода $L = 0,25 \lambda$). Параметр относительного веса претерпел значительное ухудшение ($P/S = 0,13 \text{ кг/см}^2$), причем увеличение площади катода до $S = 3,7 S_i$ все равно остается явно недостаточным для получения требуемого уровня мощности.

Наилучшие результаты обещает применение конструкции многоэтажного магнетрона с реверсной МС, схематически изображенной на рис. 3 (для простоты изображения мы ограничились тремя этажами). Распределение магнитного поля рассчитано в двухмерном приближении.

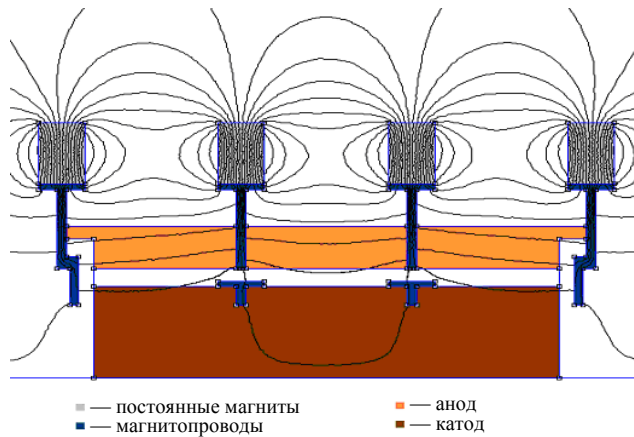


Рис. 3. Схематическое изображение конструкции трехэтажного магнетрона с реверсной МС

Анод магнетрона состоит из нескольких одинаковых резонаторных систем, образующих "этажи" (при вертикальном положении прибора), охваченные сильной связью, присоединенные к общей нагрузке. Между резонаторами размещены магнитопроводы ("междуэтажные перекрытия").

Каждый резонатор может быть либо анодом традиционного магнетрона, либо секционированным. Магнитная система магнетрона состоит из внутренних магнитопроводов, полюсных наконечников, расположенных на краях прибора, и полюсных наконечников, размещенных на катоде напротив магнитопроводов. Пространство взаимодействия может быть представлено состоящим из областей двух типов. В первом из них магнитное поле направлено преимущественно вдоль оси и однородно по длине. В областях второго типа, прилегающих к полюсным наконечникам, магнитное поле существенно неоднородно.

При подаче на катод отрицательного напряжения, равного рабочему, и рабочей температуре катодной поверхности области с однородным магнитным полем будут функционировать как парциальные магнетроны с сильной связью. Если магнитная индукция в этих магнетронах будет одинаковой, то все они будут генерировать на общую нагрузку на одной (рабочей) частоте несмотря на то, что магнитное поле в соседних магнетронах направлено противоположно.

В зонах, прилегающих к полюсным наконечникам, движение электронов будет происходить по сложным трехмерным траекториям, часть из них заканчивается на магнитопроводах, а другая часть — возвращается в рабочие области. Поскольку первый случай крайне нежелателен ввиду опасности снижения КПД, геометрия полюсных наконечников, размещенных на катоде, должна обеспечивать преобладание возвратных траекторий электронов в неоднородных областях.

Исходя из поставленных целей была рассмотрена конструкция пятиэтажного магнетрона с реверсной МС. На рис. 4 показана расчетная модель варианта МС для такого прибора.

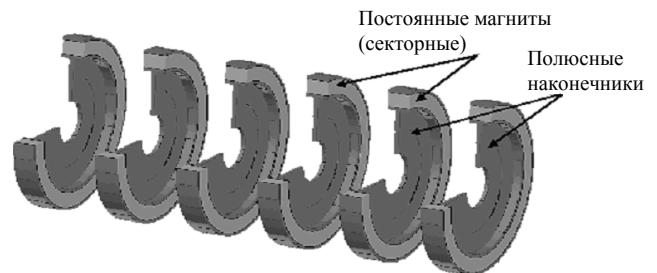


Рис. 4. Расчетная модель четырехреверсной МС для пятиэтажного магнетрона

Результаты моделирования проектируемой конструкции магнитной фокусирующей системы (МФС) представлены на рис. 5 в виде графиков распределения продольной составляющей индукции магнитного поля на пяти участках катода.

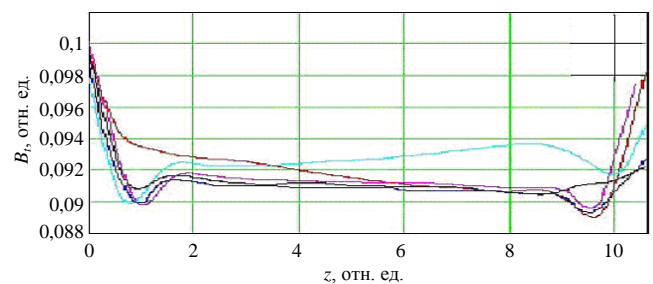


Рис. 5. Распределения продольной составляющей магнитной индукции на пяти участках катода, полученные при трехмерном моделировании реверсной МС пятиэтажного магнетрона

Поскольку во всех проектируемых вариантах кольцевые магниты выполняются из отдельных секторных секций с азимутальной протяженностью от 15 до 30°, а технологически обеспечить высокий уровень однородности намагничивания секторов постоянных магнитов достаточно сложно (и затратно), в рамках проводимой работы проводилось исследование минимально допустимой точности намагниченности отдельных секторов, обеспечивающей требуемую степень однородности магнитного поля в рабочем зазоре.

Для выяснения влияния неоднородной намагниченности секторов постоянного магнита на поле в рабочем зазоре было проведено трехмерное моделирование варианта МФС с однородным магнитным полем, в котором намагниченность каж-

дого из 12 секторов каждого кольцевого магнита варьировалась от 100 до 97 %. Это позволило оценить отклонение параметров магнитного поля при максимальной разности намагниченности секторов постоянного магнита на 3 %.

В табл. 1 и 2 (варианты 1 и 2, соответственно) приведены намагниченности секторов постоянных магнитов, полученные с использованием генератора случайных чисел для двух вариантов распределения неоднородности намагниченности секторов.

На рис. 6 представлены результаты моделирования в виде четырех распределений продольной составляющей индукции магнитного поля для четырех отрезков, принадлежащих поверхности катода.

Таблица 1

1-й вариант

Первый магнит				Второй магнит			
№ сектора	Намагниченность, %	№ сектора	Намагниченность, %	№ сектора	Намагниченность, %	№ сектора	Намагниченность, %
1	100	7	97	1	100	7	97
2	97	8	100	2	100	8	100
3	97	9	100	3	97	9	97
4	100	10	100	4	100	10	97
5	100	11	97	5	100	11	97
6	97	12	97	6	97	12	100

Таблица 2

2-й вариант

Первый магнит				Второй магнит			
№ сектора	Намагниченность, %	№ сектора	Намагниченность, %	№ сектора	Намагниченность, %	№ сектора	Намагниченность, %
1	97	7	97	1	97	7	97
2	100	8	97	2	100	8	100
3	100	9	97	3	97	9	100
4	97	10	97	4	100	10	100
5	97	11	97	5	100	11	97
6	100	12	97	6	100	12	97

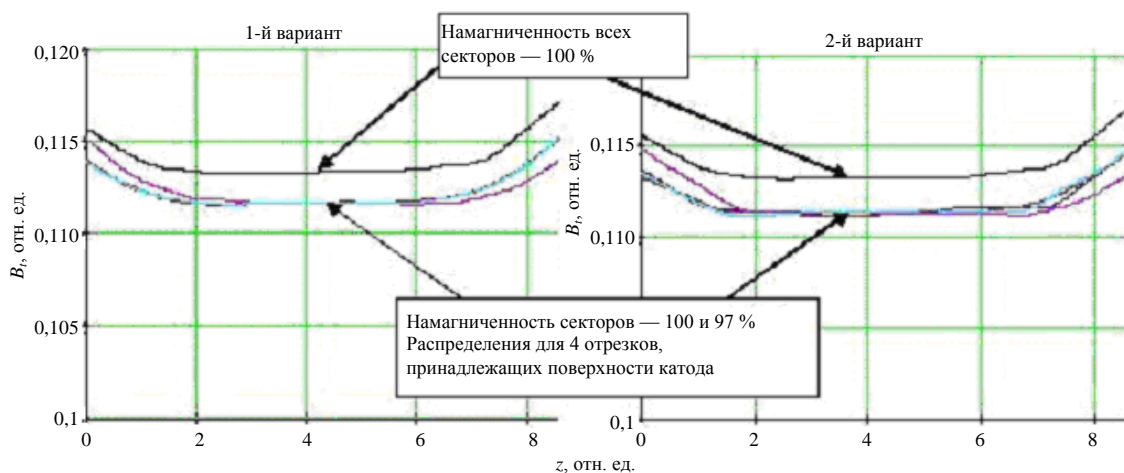


Рис. 6. Результаты моделирования распределений продольной составляющей индукции магнитного поля для четырех отрезков, принадлежащих поверхности катода, при 3%-ном разбросе намагниченности отдельных секторов, входящих в конструкцию кольцевых магнитов

Расчет веса МС показал, что на конструкции пятиэтажного магнетрона с реверсной МС можно получить наилучшие значения относительного веса ($P/S = 0,067 \text{ кг/см}^2$), а его катодная поверхность ($10,7 S_t$) достаточна для получения заданной мощности.

Заключение

Характерным моментом проделанной работы явилась важная роль параметров магнитной системы в процессе выбора конструкции прибора в целом. При этом проблема минимизации веса прибора подчинила концепцию магнетрона свойствам его вспомогательного элемента, ранее считавшегося второстепенными.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

Magnetic system characteristics may determine the design of high power magnetrons intended for use in a mobile microwave power source

P. I. Akimov, D. V. Kozirev, O. I. Senatov, D. A. Terentiev
VSUE R&P "Toriy", Moscow, Russia

V. I. Sergeev, K. L. Sergeev
Magnets and Magnetic Systems, Moscow, Russia

Given a comprehensive overview of possible paths of super-power magnetrons design with the given operating frequency, the power fixed the worker (50—80 kV) and approximately equal in all alternatives induction of a magnetic field (over the range the order 0.1 Tl).

PACS: 84.40.-Jk

* * *