

УДК 621.396

Моделирование резонатора на основе профилированного сапфирового диска

Д. А. Фролов*, Д. П. Царапкин

Сапфировые диэлектрические резонаторы (СДР), используемые в малошумящих автогенераторах СВЧ для повышения добротности колебательной системы, обычно имеют вид гладкого цилиндра или диска внутри соосного металлического экрана. Поскольку высокой добротностью обладают только высшие азимутальные моды СДР, в окрестности выбранной моды существует множество дополнительных резонансов, способных нарушить нормальную работу генератора.

Можно полагать, что если убрать диэлектрик из областей слабого поля выбранного типа колебания, то подобное изменение формы диска незначительно повлияет на плановое колебание, одновременно существенно воздействуя на мешающие моды.

Описанное преобразование, называемое далее профилированием цилиндрической поверхности, не разрушает структуру поля рабочей моды. Одновременно у мешающих колебаний, имеющих другие азимутальные индексы, возникающая в результате изъятия части материала диска периодическая неравномерность структуры заметно сдвигает резонансные частоты и порождает дополнительные дифракционные потери.

В настоящей работе впервые рассмотрена возможность разрежения спектра мешающих колебаний СДР вблизи предписанной частоты путем замены гладкой цилиндрической стенки СДР некой периодически профилированной поверхностью.

Учет специфики структуры поля в гладком диске и дополнительные соображения, связанные с технологией обработки сапфира, приводят к выводу о целесообразности использования для апробации предлагаемого метода профилирования цилиндрической стенки СДР окружениями.

При выполнении расчетов записывались частота и добротность моды, соответствующей картине поля НЕ6, и частоты ближайших по частоте мод слева и справа от базового резонанса при разных значениях формата диска. Изменение формата выполнялось вариацией высоты сапфирового зерна. Управление процессом осуществлялось дополнительной специализированной программой, которая автоматизировала запись результатов и запуск расчета в программе CST Microwave Studio.

Рассмотренные в работе примеры показывают, что изложенный метод разрежения спектра мешающих колебаний вблизи частоты плановой моды СДР путем профилирования цилиндрической поверхности может быть весьма эффективен при надлежащем выборе параметров профилирования.

Ключевые слова: дисковый диэлектрический резонатор, сапфир, СВЧ-автогенератор, профилирование.

* frolovdan12@gmail.com

Идея «профилирования»

Сапфировые диэлектрические резонаторы (СДР), используемые в малошумящих автогенераторах СВЧ для повышения добротности колебательной системы, обычно имеют вид гладкого цилиндра или диска внутри соосного металлического экрана. Поскольку высокой добротностью обладают только высшие азимутальные моды СДР, в окрестности выбранной моды существует множество дополнительных резонансов, способных нарушить нормальную работу генератора. Разработчику приходится скрупулезно подбирать соотношение радиуса $R_{\text{ц}}$ и толщины h сапфирового ядра (формат диска $\Phi_{\text{ц}} = R_{\text{ц}}/h$), для того чтобы максимально отодвинуть частоты мешающих колебаний от частоты выбранной моды [1].

В настоящей работе впервые относительно детально рассматривается возможность разрежения спектра мешающих колебаний СДР вблизи предписанной частоты путем замены гладкой цилиндрической стенки СДР некой периодически профилированной поверхностью.

Распределение электромагнитного поля азимутальных мод СДР с гладкой цилиндрической стенкой хорошо известно. В плоскости, ортогональной оси вращения, оно имеет характерный вид «ромашки». Зоны, где интенсивность поля мала, перемежаются участками высокой интенсивности поля стоячей волны (красные зоны) [2].

Положим, что если убрать диэлектрик из областей слабого поля выбранного типа колебания, подобное изменение формы диска незначительно повлияет на плановое колебание.

Описанное преобразование, называемое далее профилированием цилиндрической поверхности (либо просто «профилированием»), не разрушает структуру поля рабочей моды. Одновременно у мешающих колебаний, имеющих другие азимутальные индексы, возникающая в результате изъятия части материала диска периодическая неравномерность структуры заметно сдвигает резонансные частоты и порождает дополнительные дифракционные потери.

Изложенные соображения показаны на рис. 1, где для некоторого конкретного случая «профилирования» синим цветом выделен профиль поперечного сечения профилированного диска.

Модель профилированного резонатора

На данный момент отсутствуют какие-либо рекомендации по способам модификации цилиндрической стенки диска. Поэтому, можно выбрать любой периодический профиль, соответствующий азимутальному номеру рабочей моды.

Учет специфики структуры поля в гладком диске и дополнительные соображения, связанные с техноло-

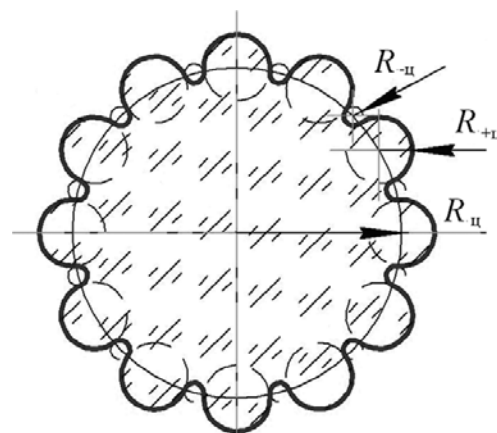


Рис. 1. Профиль поперечного сечения профилированного диска

гией обработки сапфира, привели к выводу о целесообразности профилирования цилиндрической стенки окружностями в качестве первой апробации предлагаемого метода.

Для изучения влияния профилирования цилиндрической поверхности диска на параметры электромагнитного поля выбранной моды (HE6) и частотные характеристики резонатора была составлена модель в среде CST Microwave Studio [3].

При построении расчетной модели резонатора с профилированным сапфировым ядром привлекались операции логического сложения — для цилиндров с радиусом $R_{+ц}$, и логического вычитания — для цилиндров с радиусом $R_{-ц}$ (см. рис. 1). Такая модель позволила подробно рассмотреть влияние степени направленной деформации (профилирования) цилиндрической поверхности сапфирового ядра на параметры электромагнитных полей.

Методика проведения анализа

При выполнении расчетов записывались частота и добротность моды, соответствующей картине поля HE6, и частоты ближайших по частоте мод слева и справа от базового резонанса при разных значениях формата диска. Изменение формата выполнялось вариацией высоты сапфирового ядра. Управление процессом осуществлялось дополнительной специализированной программой, которая автоматизировала запись результатов и запуск расчета в программе CST Microwave Studio.

Расчет проводился для двух вариантов сапфирового ядра:

1. «Гладкий» цилиндр радиусом $R_{\text{ц}} = 15$ мм ($R_{+ц} = R_{-ц} = 0$);

2. Цилиндр того же базового радиуса с профилированной цилиндрической поверхностью $R_{\text{ц}} = 15$ мм ($R_{+ц}$ и $R_{-ц} \neq 0$).

Первичное профилирование цилиндрической поверхности взято произвольно с учетом картины на-

пряженности электромагнитного поля *HE6*. Выбраны: радиус выступающих цилиндров $R_{+ц} = 1,5$ мм, радиус цилиндров, образующих вогнутость, $R_{-ц} = 0,7$ мм.

При моделировании добротность сапфира полагалась равной 10^4 , то есть была уменьшена на порядок, ради ускорения расчетов.

Введем формат профилирования $\Phi_n = R_{+ц}/R_{-ц}$ как отношение радиуса выступающего диска к радиусу базового гладкого диска и дополнительный формат профилирования $\Phi_{n2} = R_{-ц}/R_{-ц}$, тогда для данного варианта первого профилирования $\Phi_n = 1,5/0,7 = 2,14$; $\Phi_{n2} = 0,7/0,7 = 1$.

Результаты моделирования

Результаты моделирования приведены на рис. 2 — 5.

Из рис. 2 и 4 следует, что принятая форма профилирования цилиндрической поверхности сапфирового ядра не привела к улучшению разрежения частотного спектра вблизи моды *HE6*.

На рис. 3, 5 показано влияние выбора формата диска на добротности моды *HE6* и примыкающих к ней мод. Для диска без профилирования добротности большинства соседних мод находятся в интервале 100 — 1000. После профилирования добротность боль-

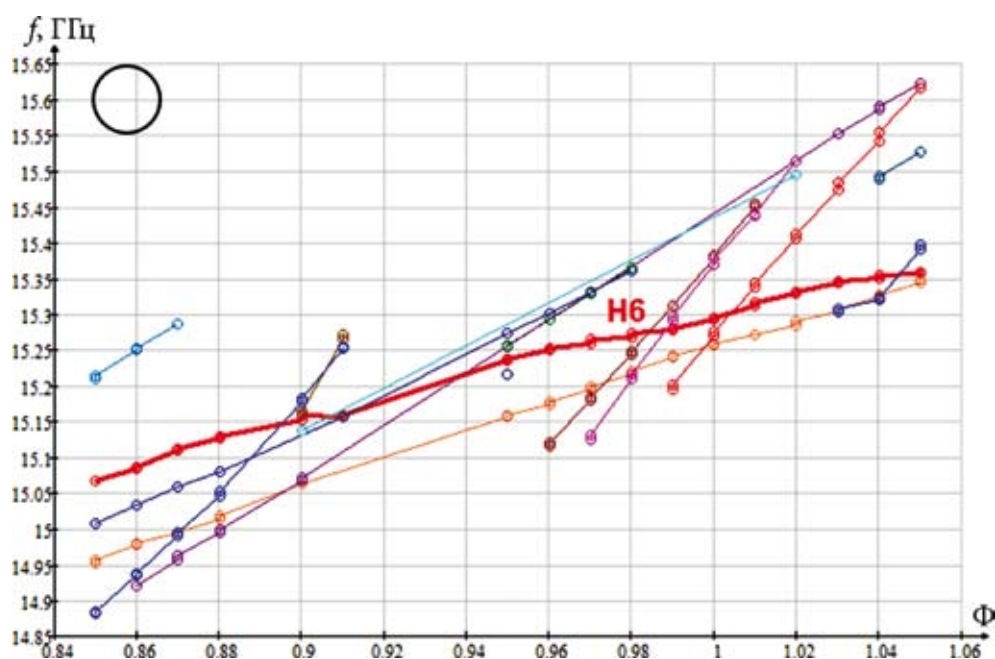


Рис. 2. Влияние формата диска на частоту колебания *HE6* и частоты примыкающих мод в случае гладкого диска

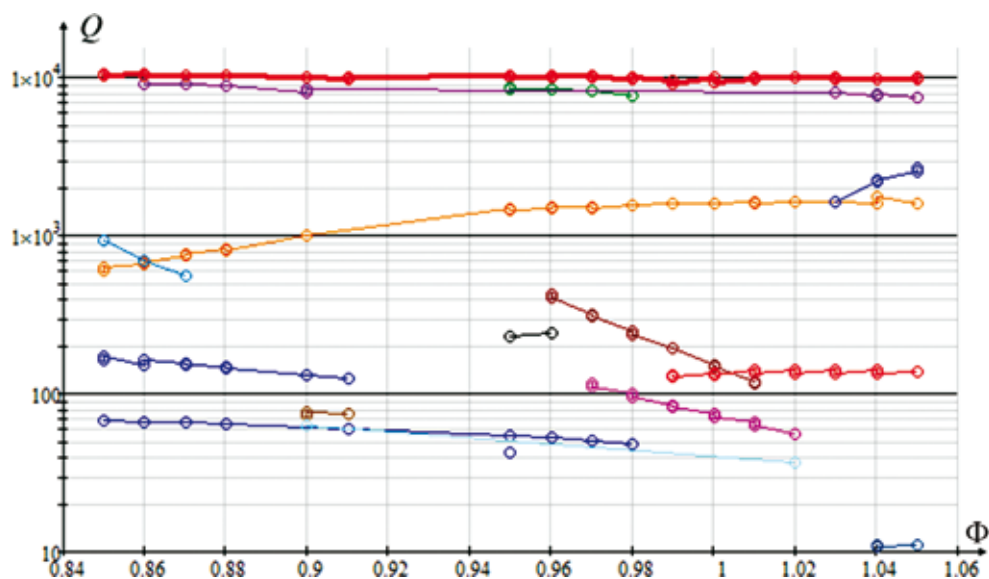


Рис. 3. Влияние формата диска на добротность колебания *HE6* и добротности примыкающих мод в случае гладкого диска

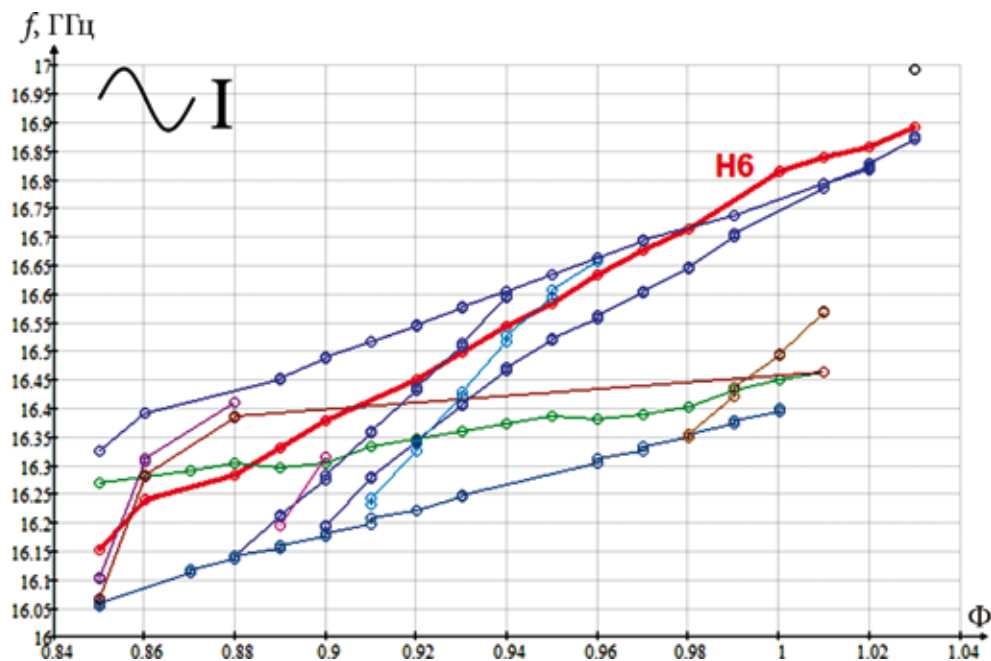


Рис. 4. Профилирование по первому варианту. Зависимость частоты моды *HE6* и частот соседних мод от формата диска

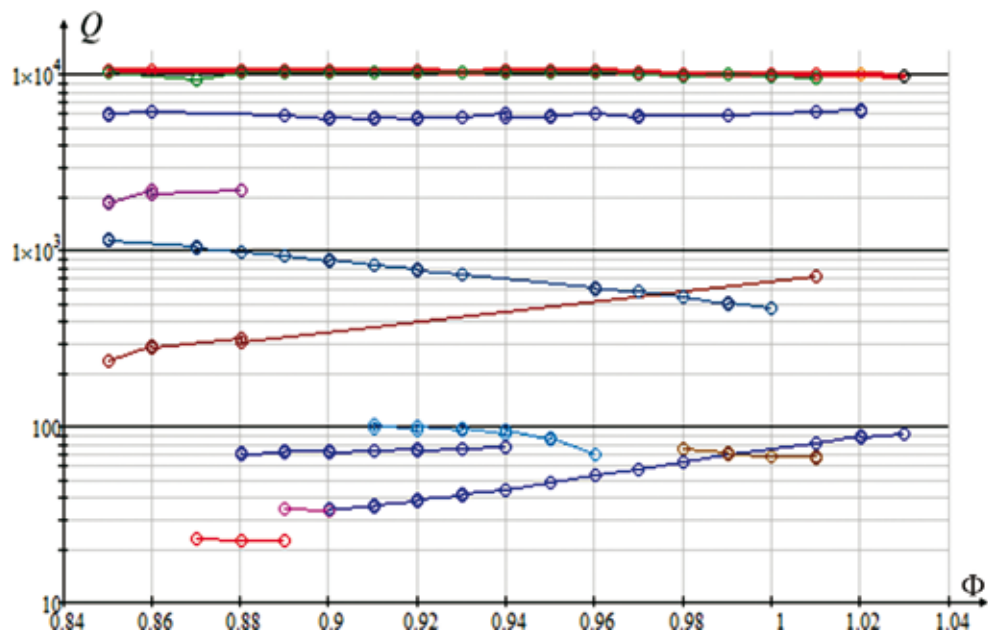


Рис. 5. Профилирование по первому варианту. Зависимость добротности моды *HE6* и добротностей соседних мод от формата диска

шинства побочных мод уменьшается на порядок. Вместе с тем сохраняются некоторые мешающие моды с добротностями, сравнимыми с добротностью выбранного типа колебания.

Этот пример показывает, что выбор благоприятных параметров профилирования возможен лишь в результате тщательного учета влияния вариации размеров диска на спектр резонансных колебаний.

Более удачным оказывается следующее значение параметров профилирования (вариант 2; рис. 6): радиус выступающих цилиндров составляет 2 мм, а радиус

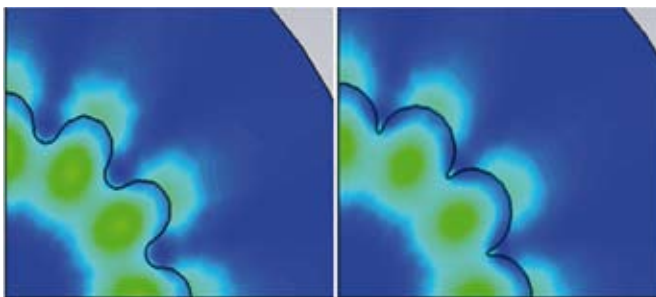


Рис. 6. Профиль цилиндра при профилировании по первому (слева) и второму (справа) вариантам

удаленных равен 0,09 мм. При таких параметрах диска $\Phi_{п1} = 0,133$; $\Phi_{п2} = 0,006$. Результаты моделирования для данного случая представлены на рис. 7, 8 соответственно.

Из рис. 7 очевидно, что для моды *HE6* второй вариант профилирования привел к появлению протяженной зоны форматов (0,95...1,0), в которой соседние моды отстоят от моды *HE6* на 30 МГц и более.

Согласно рис. 8 добротности большей части прилегающих мод составляют менее 100.

Заключение

Рассмотренные в работе примеры показывают, что предложенный нами метод профилирования цилиндрической поверхности СДР с целью разрежения спектра мешающих колебаний вблизи частоты плановой моды может быть весьма эффективен при надлежащем выборе параметров профилирования.

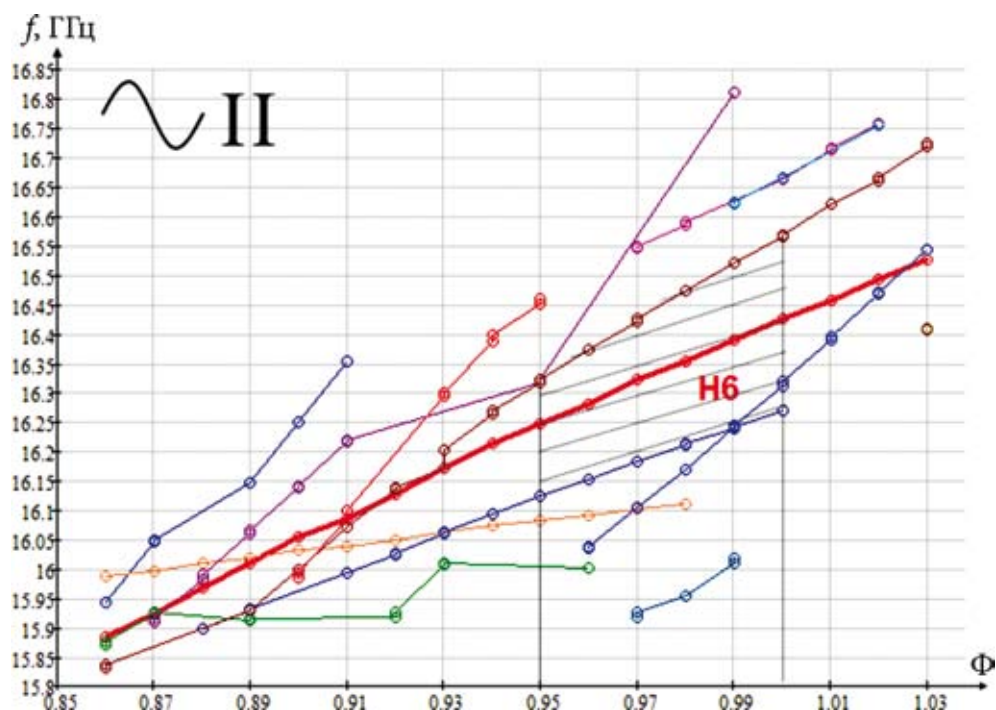


Рис. 7. Профилирование по второму варианту. Зависимость частоты моды *HE6* и частот соседних мод от формата диска

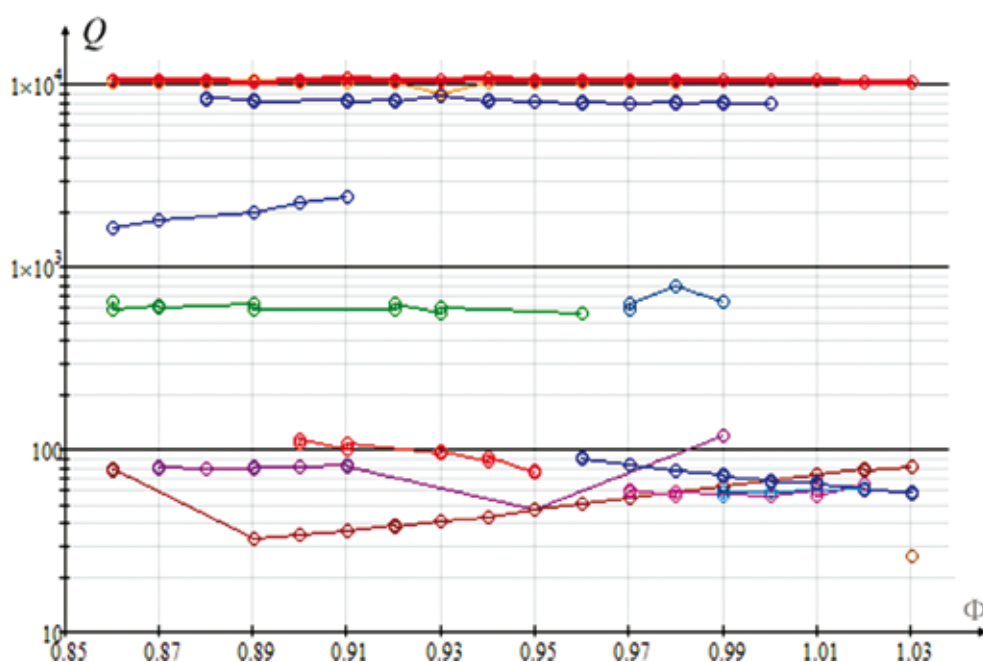


Рис. 8. Профилирование по второму варианту. Зависимость добротности моды *HE6* и добротностей соседних мод от формата диска

Литература

1. Царапкин Д.П., Фролов Д.А. Расчет колебательной системы задающего генератора системы «ГЛОНАСС» // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. XX Междунар. НТК студентов и аспирантов. В 4 т. Т. 1. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. С. 37.

2. Царапкин Д.П., Иванов Е.Н., Мухтаров И.Н. Высокочастотные дисковые диэлектрические резонаторы // Радиотехника и электроника. 1983. Т. 28. № 8. С. 1658 — 1659.

3. Курушин А.А. Школа проектирования СВЧ-устройств в CST Studio Suite. М.: ООО «Сам Полиграфист», 2014. С. 433.

Статья поступила в редакцию 20.02.2016