

Исследование секторного Н-резонатора

О.К. Беляев, А.Д. Рябов, В.Б. Степанов

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Для ускоряющей структуры с нарастающим напряжением на периодах ускорения [1] предложен секторный резонатор с продольным магнитным полем — SH-резонатор (рис. 1). Предварительные оценки показали, что потери ВЧ-мощности в таком резонаторе будут больше, чем в 2К-резонаторе [2], но меньше, чем в Н-резонаторе. При этом многие технологические приемы изготовления резонаторов и монтаж электродов вне контейнера, отработанные на 2Н- и Н-резонаторах [3], представляются подходящими к предложенному резонатору. Для разработки конструкции резонатора с ускоряющими электродами требуется выполнить комплекс экспериментальных и расчетных исследований, которым и посвящена данная работа.



Рис. 1: Фото макета SH-резонатора с электродами, помещенного в цилиндрический экран-контейнер.

Для проведения экспериментальных исследований был создан специальный стенд. Стенд состоял из макета SH-резонатора, помещенного в цилиндрический экран-контейнер

длиной 1100 мм и диаметром 520 мм (рис. 1). Резонатор был нагружен системой электродов пяти периодов ускорения, использовавшихся ранее в 2К-резонаторе. Ноги крепления промежуточных электродов были установлены под расчетными углами согласно соотношениям, приведенным в работе [1]. Из работы [1] следует, что при отсутствии тока по ноге промежуточного электрода, установленного под расчетным углом, напряжение между ускоряющим и фокусирующим зазорами периода ускорения делится в требуемом соотношении. Как и ожидалось, этот макет удалось настроить на рабочую частоту $f = 148,5$ МГц, увеличив зазор между резонатором и дном контейнера.

Для получения расчетных параметров резонатора использовалась двумерная программа PRUD-0 [4, 5], поэтому в расчетах реальные электроды были заменены пластинами предварительно выбранной толщины и ширины (5×51 мм). Зазор между пластинами был подобран таким, чтобы расчетная и измеренная частоты были равными. Поперечное сечение расчетной модели с обозначениями основных геометрических параметров показано на рис. 2.

В полученной таким образом расчетной модели емкостная нагрузка, обусловленная плоскими электродами, должна быть эквивалентна емкостной нагрузке резонатора с реальными электродами. На такой модели были проведены расчеты всех радиотехнических параметров резонатора и распределений Е- и Н-полей при вариации основных конструктивных размеров.

В пространстве между резонатором и контейнером магнитное поле достигает максимума под резонатором и спадает по мере приближения к его краям. Соответствующие расчетная и экспериментальная зависимости показаны на рис. 3. В максимуме магнитного поля должна располагаться петля ввода мощности для возбуждения резонатора. При изменении высоты d установки SH-резонатора в контейнер характер распределения магнитного поля не меняется. Увеличение d приводит к снижению собственной частоты резонатора — расчетная и экспериментальная зависимости на рис. 4а. Уменьшение частоты объясняется ростом емкости резонатора (рис. 4б), что приводит также к увеличению потерь (рис. 4в). При проведении расчетов напряжение U_0 между плоскими электродами поддерживалось постоянным, поэтому можно утверждать, что увеличение размера d приводит к падению шунтового сопротивления SH-резонатора $R_{ш} = U^2/2P$. Так как SH-резонатор предназначен для работы с ускоряющей структурой, снижение $R_{ш}$ энергетически невыгодно.

Из проведенного рассмотрения следует, что высота d постановки SH-резонатора в контейнер должна быть минимальной, обеспечивающей размещение петли ввода мощности в пространстве между резонатором и контейнером.

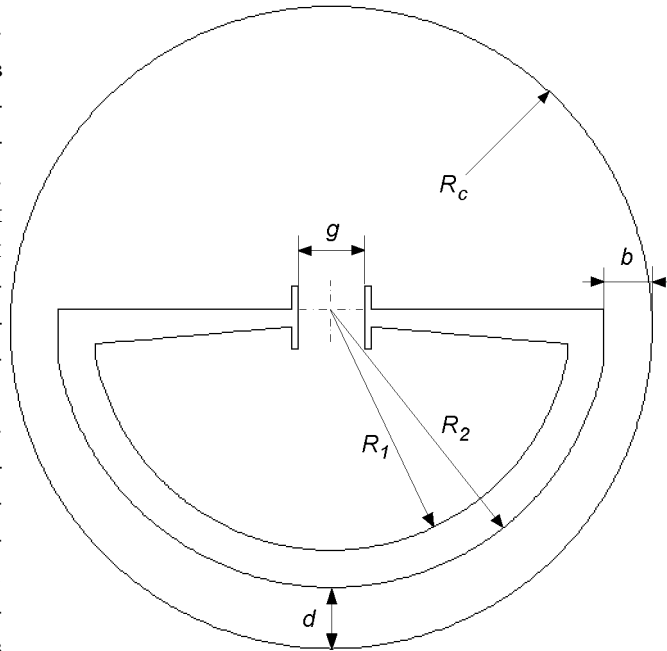


Рис. 2: Поперечное сечение расчетной модели SH-резонатора. $R_c = 260$ мм, $R_1 = 195$ мм, $R_2 = 22$ мм, $g = 20 \div 80$ мм, $d = 2 \div 70$ мм, $b = 35 \div 55$ мм.

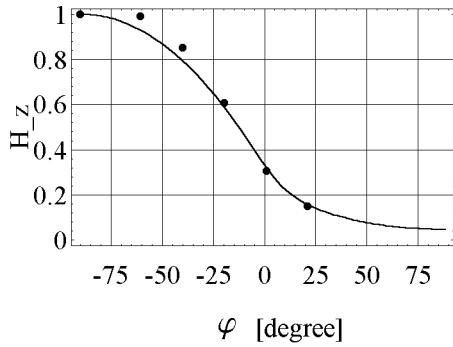


Рис. 3: Распределение H_z -компоненты магнитного поля (нормированное на максимальное значение) по поверхности контейнера. Точки — эксперимент, сплошная линия — расчет. Значение угловой координаты $\varphi = 90^\circ$ соответствует самой нижней точке контейнера.

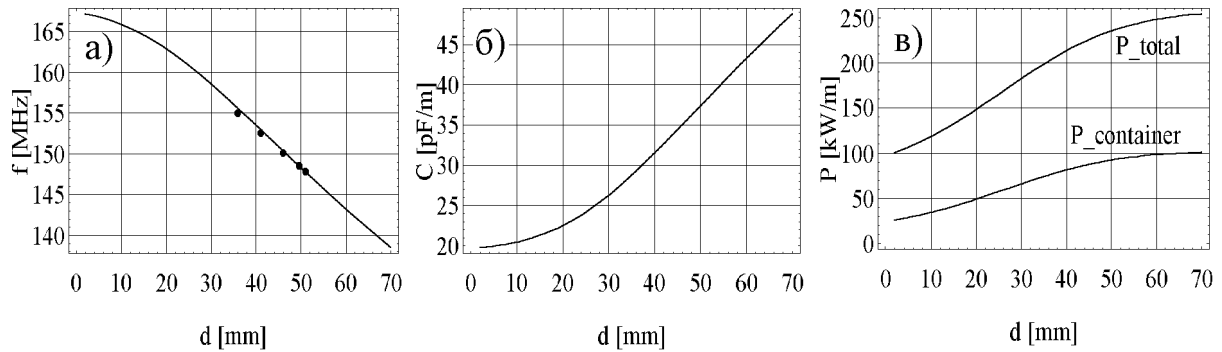


Рис. 4: Зависимости частоты, емкости и мощности потерь от величины зазора d между резонатором и дном контейнера.

Результаты расчета показывают, что увеличение g ведет к монотонному повышению собственной частоты резонатора (рис. 5а). При этом наблюдается незначительное уменьшение и последующий заметный рост эквивалентной емкости резонатора (рис. 5б), а также монотонное увеличение потерь (рис. 5в). Объяснение необычного характера двух последних зависимостей состоит в перераспределении электрического поля из межэлектродного зазора в область края резонатора при увеличении g . Для увеличения поля в межэлектродном зазоре и снижения потерь необходимо ослабить влияние области края резонатора.

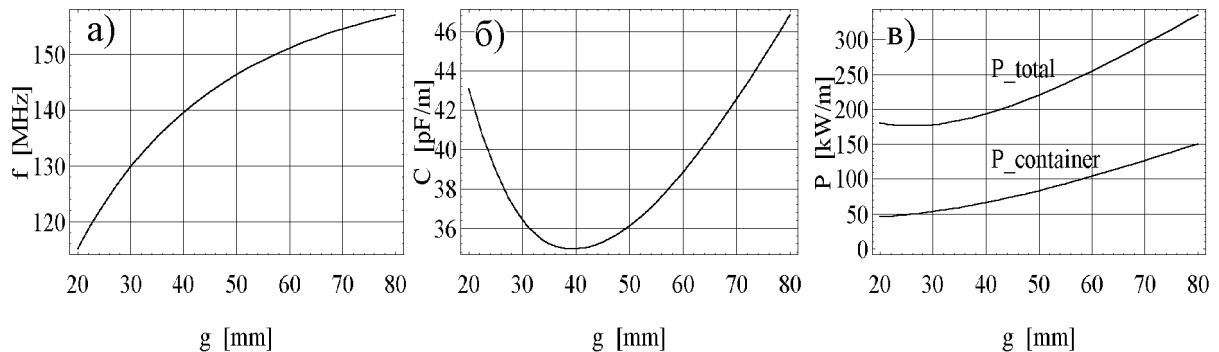


Рис. 5: Зависимости частоты, емкости и мощности потерь от величины зазора g между плоскими электродами.

Увеличение зазора b путем локального уменьшения толщины стенки резонатора у его края при постоянной собственной частоте приводит к уменьшению потерь до 20%. Таким образом, SH-резонатор должен иметь значительную емкость в области электродов и минимальную емкость между контейнером и внешней поверхностью резонатора в области его края (максимально допустимый размер b).

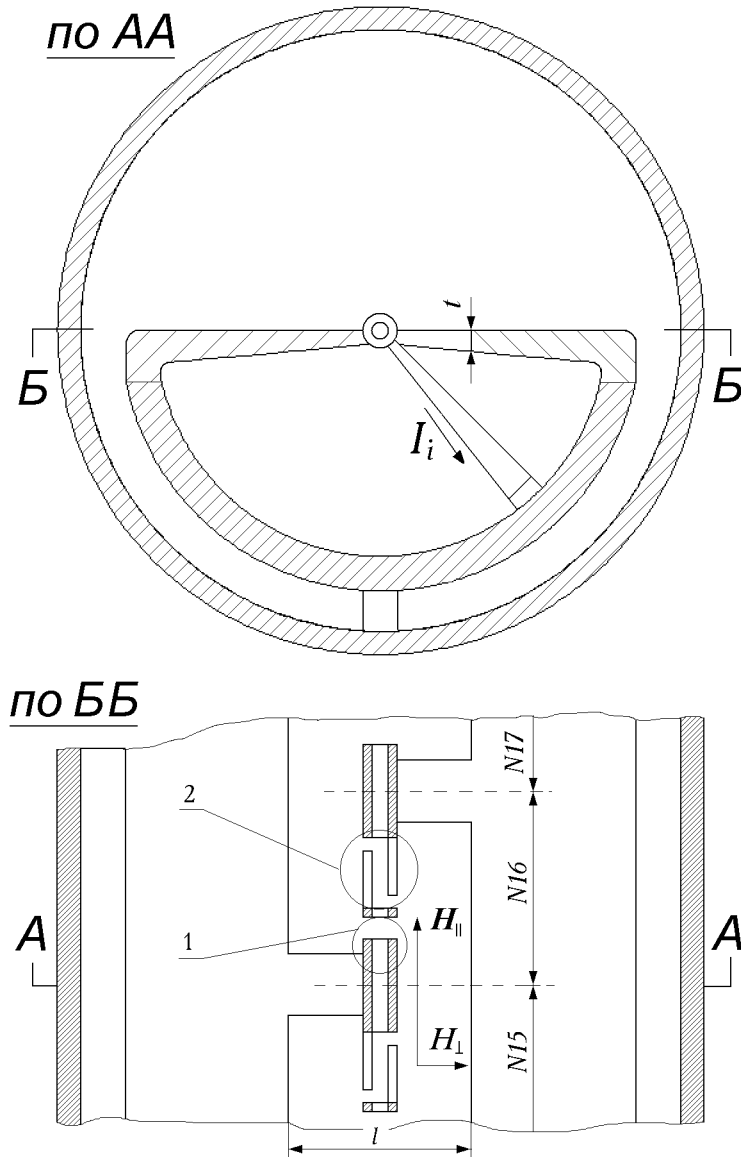


Рис. 6: Нагрузка резонатора электродами реальной формы. 1 — ускоряющий зазор, 2 — фокусирующий зазор, l и t — характерные размеры в области размещения электродов, $N15 \div N17$ — моделируемые периоды ускорения, H_{\parallel} и H_{\perp} — продольная и поперечная компоненты магнитного поля, I_i — ток в ноже промежуточного электрода i -го периода ускорения.

Сделанный вывод основан на результатах расчета в двумерном приближении. Однако нагрузка резонатора реальной трехмерной системой электродов (рис. 6) приводит к нарушению расчетной структуры полей, в частности, к появлению в области электродов поперечной компоненты магнитного поля и продольной электрического поля. Это может оказать влияние на соотношение напряжений на ускоряющем U_a и фокусирующем $U_{кв}$ зазорах периодов ускорения. Настройка структуры на SH-резонаторе, как и в [1], проводилась путем изменения величин емкостей ускоряющего (поз. 1) и фокусирующего (поз. 2) зазоров за счет специальных накладок для устранения токов по ногам промежуточных электродов (рис. 6). Затем во всех периодах ускорения методом малых возмущений были измерены величины $\alpha = \sqrt{\Delta f_{кв}/\Delta f_a} \sim U_{кв}/U_a$, где $\Delta f_{кв}$ и Δf_a — частотные расстройки при помещении возмущающего тела в фокусирующий и ускоряющий зазоры соответственно. Измеренные α и требуемые α_{mp} [1] величины показаны на рис. 7 (графики 1 и 3 соответственно). Видно, что имеется значительное (до 10%) расхождение величин α и α_{mp} при допуске $1 \div 2\%$.

Такое расхождение можно объяснить влиянием поперечной компоненты H_{\perp} магнитного поля, возникающего из-за продольного тока проводимости по электродам и тока смещения между разнополярными трубками дрейфа через промежуточный электрод. Рассматриваемый макет SH-резонатора, нагруженный электродами, имел характерные размеры в области размещения электродов (щели резонатора) $l = 180$ мм и $t = 10$ мм, в то время как в 2К-резонаторе [1] с теми же электродами эти величины равнялись 120 и 30 мм соответственно. Уменьшенная емкостная нагрузка щели привела к уменьшению продольной компоненты H_{\parallel} магнитного поля и возрастанию влияния H_{\perp} . Для ослабления эффекта неоднородности магнитного поля размер l был уменьшен до 120 мм, а размер t увеличен до 30 мм. Измеренные в этом случае величины α также показаны на рис. 7 (график 2). Среднеарифметическое отклонение α от α_{mp} не превышает 1%.

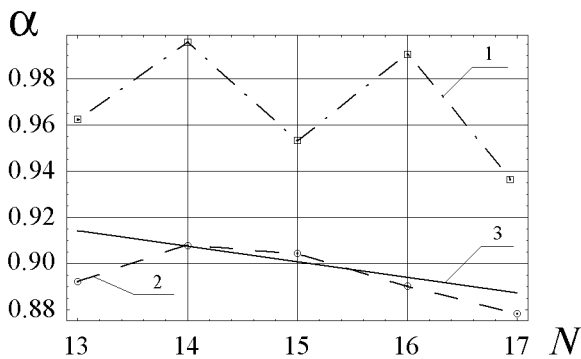


Рис. 7: Результаты настройки макета ускоряющей структуры на SH-резонаторе для периодов ускорения $N_{13} \div N_{17}$. 1 — для размеров $l = 180$ мм и $t = 10$ мм; 2 — для размеров $l = 120$ мм и $t = 30$ мм; 3 — требуемая зависимость.

Из проведенного рассмотрения следует недопустимость чрезмерного уменьшения емкостной нагрузки в области размещения электродов. Этот вывод не противоречит выводу об увеличении емкости между плоскими электродами, сделанному ранее по энергетическим соображениям.

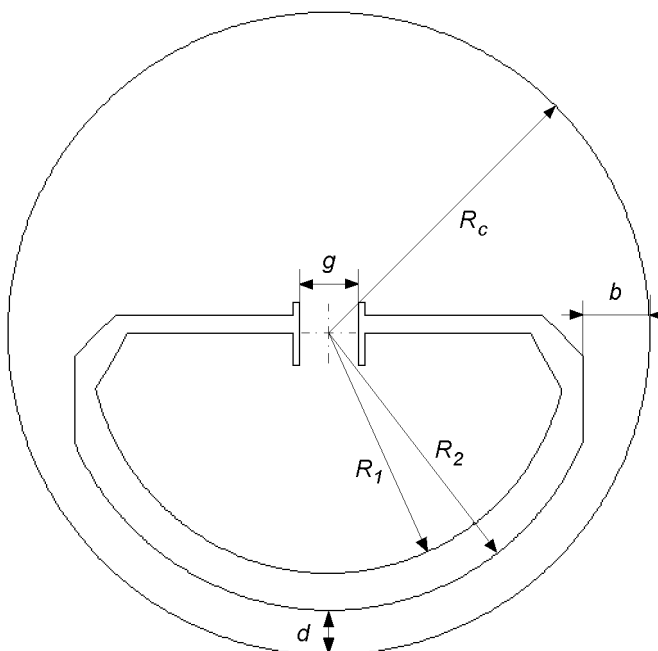


Рис. 8: Поперечное сечение SH-резонатора с уточненной геометрией. $R_c = 260$ мм, $R_1 = 194$ мм, $R_2 = 224$ мм, $g = 48,3$ мм, $d = 36$ мм, $b = 54$ мм.

В результате проведенных комплексных исследований была разработана форма поперечного сечения секторного H-резонатора. Поперечное сечение с указанием характерных размеров приведено на рис. 8. Угол раскрытия сектора выбран равным 180° . Ось канала ускорения совмещена с осью контейнера. При этом размер d достаточен для размещения петли ввода мощности в максимуме магнитного поля. Локальное уменьшение толщины стенок резонатора привело к уменьшению потерь в стенках резонатора. По величине потерь SH-резонатор занимает промежуточное положение между H- и 2К-резонаторами: $P_H = 1$; $P_{SH} \approx 0,85$; $P_{2K} \approx 0,58$.

Расчеты высших типов колебаний показали, что по частоте они достаточно далеко отстоят от рабочей частоты $f_0 = 148,5$ МГц (205,5; 488,9; 638,8 МГц), и их можно не рассматривать в рамках этой работы.

Показано, что в реальной трехмерной системе электродов при определенных размерах области размещения электродов возможно произвести настройку требуемого деления напряжения между ускоряющими и фокусирующими зазорами. При этом реализуются рекомендации расчетов об увеличении емкости между плоскими электродами (т.е. об уменьшении зазора между ними) с целью уменьшения мощности потерь в стенках резонатора.

Рассчитанные частные производные частоты и мощности потерь по основным размерам позволили определить допуски на эти размеры при изготовлении и необходимый диапазон подстройки частоты из-за неточностей изготовления. Кроме того, знание этих производных способствует правильному выбору размеров поперечного сечения, что ускоряет процесс конструирования резонатора.

Авторы благодарят В.А.Теплякова за поддержку работы и ценные замечания.

Список литературы

- [1] *Беляев О.К., Клоков В.В., Севостьянов В.С., Степанов В.Б.* — Препринт ИФВЭ 93-140. Протвино, 1993. *Belyaev O.K. et al.* Turning Method for the Accelerating Structure with RFQ Focusing and Increasing Voltage. // Proc. of the 1994 Int. L.C., Tsukuba, Japan. 1994, V.1, p.296.
- [2] *Беляев О.К., Игошин В.Б., Пьяных С.В., Степанов В.Б.* — Препринт ИФВЭ 92-58. Протвино, 1992.
- [3] *Атачкин А.Ж., Андрианов М.Н., Беляев О.К. и др.* Конструкторско-технологические особенности ускоряющих систем линейных ускорителей ИФВЭ с ВЧК-фокусировкой. // Труды XIV Сов. по ускор. заряж. частиц. Протвино 1994, т.3, с.137.
- [4] *Абрамов А.Г., Дайковский А.Г., Ершов С.Ю. и др.* — Препринт ИФВЭ 83-3. Серпухов, 1983.
- [5] *Дайковский А.Г., Португалов Ю.И., Рябов А.Д.* Комплекс программ для расчета ускоряющих структур. // ЖВТ и МФ, 1986, т.26, N 8, сс.1206-1214.