

## ОДНОМОДОВЫЙ РЕЗОНАТОР НА ЧАСТОТУ 350 МГц ДЛЯ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА МЕГАУСТАНОВКИ «СИЛА»

Ю. В. Зуев<sup>a, 1</sup>, М. В. Варламова<sup>a</sup>, З. А. Андреева<sup>a</sup>, А. А. Акимова<sup>a</sup>

<sup>a</sup> АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

Представлены проектные параметры ускоряющего резонатора с подавлением высших типов колебаний поля специальными поглощающими нагрузками. Описана конструкция резонаторов и вакуумных нагрузок. Приводятся расчетные электродинамические характеристики резонатора и результаты теплогидравлического моделирования.

Design parameters of the accelerating cavity with vacuum loads to suppress high order modes are reported. Features of the cavity design and loads are described. Calculated electrodynamic properties of the cavity as well as results of the thermo-hydraulic simulations are presented.

PACS: 29.20.db; 29.20.dk

### ВВЕДЕНИЕ

Проект «СИЛА» предполагает создание междисциплинарной исследовательской установки класса «мегасайенс» на базе источника синхротронного излучения четвертого поколения, объединяющего накопительное кольцо (НК) и лазер на свободных электронах [1, 2]. В качестве аналога при разработке НК использовалась магнитная структура Европейского источника синхротронного излучения (ESRF) [3]. Для снижения равновесного горизонтального эмиттанса до величины 70 пм·рад был уменьшен угол поворота пучка на регулярном периоде структуры и увеличено их число. В результате количество выводов излучения возросло до 74, а периметр кольца из 40 модифицированных суперпериодов достиг 1103 м. Структура НК содержит четыре десятка прямопролетных промежутков длиной 5,3 м, три из которых предназначены под установку резонаторов ускоряющей системы. При энергии пучка 6 ГэВ потери на излучение могут достигать 2 МэВ. Ускоряющая система предназначена для компенсации этих потерь и может включать до десяти резонаторов с суммарным ускоряющим напряжением 5 МВ.

### 1. ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ

Максимальная яркость излучения НК, работающего в многосгустковом режиме, ограничивается когерентными неустойчивостями накопленного заряда, которые препятствуют повышению циркулирующего тока выше некоторого порогового уровня

---

<sup>1</sup>E-mail: zuev@luts.niiefa.spb.su

из-за потерь частиц и существенного ухудшения качества пучка. Источником неустойчивостей является паразитное электромагнитное поле высших мод (ВМ), возбуждаемое пучком в окружающем его оборудовании и, в первую очередь, в резонаторах ускоряющей системы. К средствам борьбы с неустойчивостями относят [4, 5]: а) оптимизацию формы резонаторов, проводимую с целью частотного разделения спектров колебаний тока и паразитных мод резонатора; б) использование резонаторов с низким отношением  $R/Q$  для всех мод; в) установку дополнительных вводов мощности и тюнеров с системами обратной связи; г) тепловую расстройку ВМ; д) селективное снижение добротности ВМ за счет внешней или внутренней нагрузки таким образом, чтобы наведенное сгустком напряжение затухало к приходу следующего сгустка.

Наибольшее распространение в последнее время получили резонаторы с одной запертой модой (single trapped mode resonator) [6]. Они успешно эксплуатируются или будут установлены на кольцевых источниках синхротронного излучения BESSY, ALBA, PETRA, ESRF, СКИФ и др. Для подавления ВМ в этих резонаторах используются поглощающие нагрузки, связанные с основной частью резонатора отрезками волноводов. Размер и форма поперечного сечения волноводов должны обеспечивать прохождение к нагрузке всех ВМ и запирание рабочей моды колебаний поля. Для уменьшения габаритных размеров и увеличения широкополосности применяют прямоугольные или круглые волноводы гребневого типа. Минимальная длина волновода ограничивается мощностью основной моды, достигающей нагрузки, т. е. допустимым снижением добротности моды. Количество волноводов и место их установки определяется по результатам расчета мод, возбуждаемых в резонаторе, исходя из распределения полей и поверхностных токов. Наличие трех волноводов, устанавливаемых по азимуту обечайки с интервалом  $120^\circ$ , является необходимым условием для сохранения симметрии поля основной моды и демпфирования ВМ с любой поляризацией волн. Продольное смещение волноводов друг относительно друга повышает эффективность вывода мод с вариациями поля вдоль оси пучка. Конфигурация поглощающих нагрузок зависит от свойств материала поглотителя и оптимизируется в требуемой полосе частот по минимуму отраженной мощности. Помимо высокой поглощающей способности, теплопроводности и механической прочности, материал поглотителя должен иметь низкий уровень газовыделения, необходимый для получения рабочего вакуума на уровне  $10^{-9}$  Торр, обеспечивать возможность прочного и надежного соединения с медью пайкой или сваркой, высокую предельную температуру применения и стабильность параметров.

## 2. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Из-за близости рабочих частот, в качестве аналога при проектировании резонатора НК «СИЛА» использовался резонатор, разработанный для ESRF [7, 8]. Основные конструктивные части резонатора (корпус и съемные поглощающие нагрузки с волноводными частями) показаны на рис. 1. Навесное оборудование резонатора также включает: устройство ввода мощности (не менее 95 кВт), тюнер, датчики электрического поля, основной и форвакуумный насосы, датчики давления, элементы и узлы системы охлаждения. Неразборный корпус образуют сегменты обечайки, торцевые

стенки и начальные участки волноводов, которые соединяются между собой с помощью электронно-лучевой сварки и пайки в вакуумной печи (рис. 2, слева). Продольное сечение основной (цилиндрической) части резонатора имеет  $\Omega$ -образную форму (рис. 2, справа), которая оптимизировалась исходя из требуемых электродинамических характеристик на частоте рабочей моды поля (таблица).

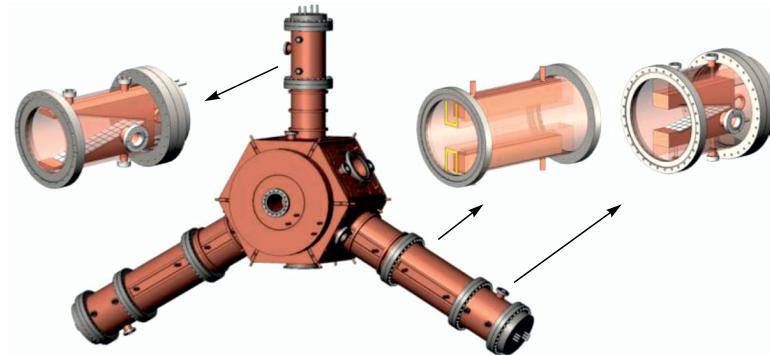


Рис. 1. Общий вид и съемные части резонатора

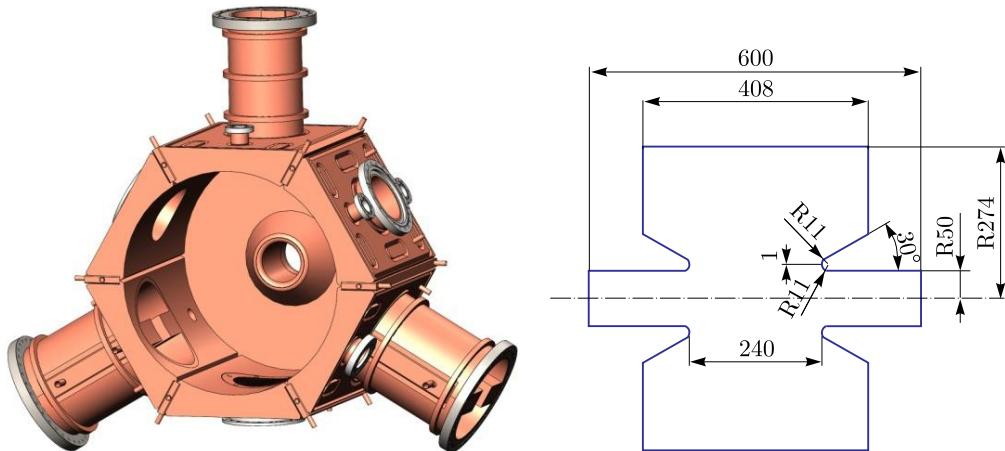


Рис. 2. Корпус резонатора и размеры поперечного сечения основной рабочей части

#### Параметры резонатора на основной моде $E_{010}$

| Параметр   | Значение        |
|--|-----------------|
| Напряжение номинальное, кВ   | 500             |
| Напряжение максимальное, кВ  | 750             |
| Частота номинальная, МГц   | 350             |
| Диапазон перестройки от номинальной частоты, кГц                         | $-200$ – $+800$ |
| Отношение сопротивления к добротности $R_{\text{сф}}^{\text{pt}}/Q$ , Ом | 140             |
| Добротность резонатора с нагрузками ВМ                                   | 38 000          |

Из-за большого числа портов для навесного оборудования размеры внутренней полости резонатора, влияющие на резонансную частоту, не могут быть определены достаточно точно, поэтому для предварительной настройки резонатора на частоту рабочей моды толщина одной из торцевых стенок корпуса должна иметь припуск. Расчетная чувствительность частоты рабочих колебаний поля к расстоянию между торцевыми стенками составила 410 кГц/мм, расстояние между носиками фиксировано.

На корпус резонатора устанавливаются круглые гребневые волноводы с шириной гребня 60 мм. Основные нижние волноводы одинаковые. Их внутренний диаметр 230 мм, расстояние между гребнями 69 мм, частота отсечки чуть выше 450 МГц. Верхний вспомогательный волновод имеет диаметр 160 мм и расстояние между гребнями 130 мм, частота отсечки — 1560 МГц. Волноводы заканчиваются съемной клиновидной нагрузкой из никель-цинкового феррита марки С-48, рассчитанной на поглощение энергии электромагнитного поля с поверхностной плотностью мощности до 15 Вт/см<sup>2</sup>. Феррит имеет низкий уровень газовыделения [9], прочностные и теплофизические характеристики материала приведены в справочнике [10]. Закладываемая в расчеты зависимость комплексной магнитной проницаемости от частоты заимствована из работы [11].

Поглотитель крепится на наклонную часть ребер длиной 200 или 250 мм в зависимости от диаметра волновода. Из-за большого различия в коэффициенте теплового расширения феррита и меди необходимо использовать ферритовые пластины размером не более 20 × 20 мм, размещаемые с тепловым зазором около 1 мм. Толщина пластин 2,7–3,2 мм. Пайка феррита к меди должна осуществляться припоеем с низкой температурой плавления: Sn(90%)Ag(10%) или Au(80%)Sn(20%). Для выравнивания коэффициентов теплового расширения может использоваться промежуточный слой из синтерированного композитного материала на основе меди и вольфрама (Elconit). Медь под ферритом должна быть отожжена и не иметь внутренних механических напряжений [12].

Волноводные части и нагрузки присоединяются с помощью металлических уплотнений типа Conflat, VAT или HTMS, что позволяет проводить обезгаживающий прогрев резонатора в сборе. При использовании CF250 надлежащий электрический контакт частей обеспечивается медной прокладкой по внешнему контуру волновода и специальными контактными пластинами с набором упругих ламелей (RF fingers) по контуру ребер.

### 3. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ РАБОТЫ

Расчетная тепловая мощность, рассеиваемая в стенках резонатора при обеспечении требуемого класса чистоты токонесущих поверхностей,  $Ra \leq 0,8$  мкм, не превышает 35–37 кВт. Суммарная мощность, поглощаемая в объеме ферритовых пластин, оценивается величиной не более 1200 Вт. Для отвода выделяющегося тепла в стенках корпуса, волноводных частей и нагрузок предусмотрены каналы водяного охлаждения. В зависимости от конструкции и технологии изготовления корпуса рассматривались два варианта объединения каналов охлаждения в гидравлические контуры с близкими расходами воды и эффективностью теплосъема (рис. 3, в центре и слева). Результаты теплогидравлического моделирования показали, что оба варианта равнозначны. При номинальном расходе воды 10 л/мин в каждом контуре расчетные

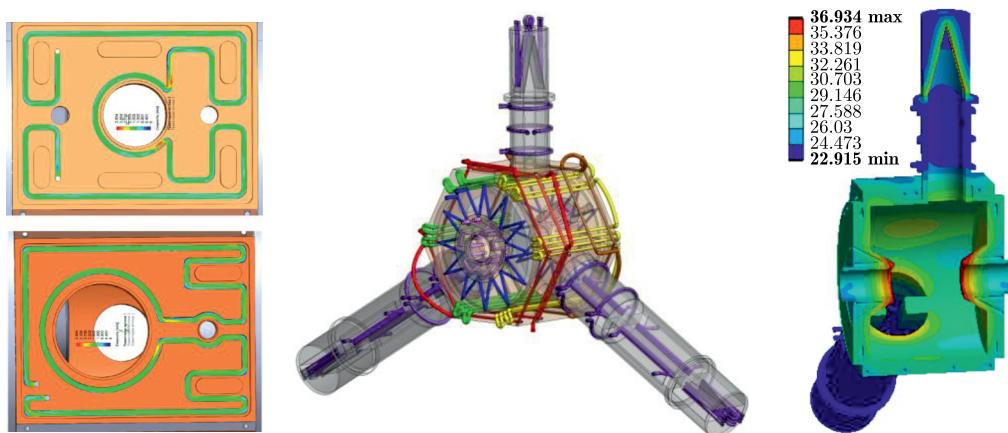


Рис. 3. Результаты теплового и гидравлического моделирования (справа и слева), один из вариантов объединения каналов охлаждения в гидравлические контуры (в центре)

значения температур составили для стенок резонатора 23–37°C, объема ферритового поглотителя 29–37°C (см. рис. 3, справа). Перегрев воды между входом и выходом не более 6°C.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проектных работ проанализированы используемые на практике методы борьбы с паразитными модами колебаний поля в ускоряющих резонаторах кольцевых источников синхротронного излучения. Установлены принципы работы одномодового резонатора для НК «СИЛА». Определены основные конструктивные параметры резонатора, сформулированы требования к технологии изготовления. Правильность принятых технических решений подтверждается результатами электромагнитного и теплогидравлического моделирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковальчук М. В. и др. Источник синхротронного излучения четвертого поколения с рентгеновским лазером на свободных электронах «СИЛА»: концепция ускорительно-накопительного комплекса // Кристаллография. 2022. Т. 67, № 5. С. 726–734.
2. Гавриш Ю. Н. и др. Ускорительно-накопительный комплекс мегаустановки «СИЛА» // Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21, № 3(254). С. 257–265.
3. Raimondi P. et al. EBS Storage Ring Technical Report. European Synchrotron Radiation Facility, 2018.
4. Boni R. HOM-Free Cavities // Proc. EPAC 1996, Sitges, Barselona, 1996. Р. 182–188. TUY01A.
5. Каминский В. И., Сенюков В. А., Собенин Н. П. Высшие типы волн в элементах ускоряющих структур: Учеб. пособие. М.: МИФИ, 2002. 104 с.
6. Conciauro G., Arcioni P. A New HOM-Free Accelerating Resonator // Proc. Second Eur. Part. Accel. Conf., Nice, France, 1990. Р. 149–151.

7. *Guillotin N., Jacob J., Serrière S.* Development of HOM Damped Copper Cavity for ESRF // Proc. EPAC 2006, Edinburgh, Scotland, 2006. P. 1244–1246. TUPCH099.
8. *Serrière V. et al.* 352.2 MHz HOM Damped Normal Conducting ESRF Cavity: Design and Fabrication // Proc. IPAC2011, San Sebastián, Spain, 2011. P. 68–70. MOPC004.
9. *Boni R. et al.* Study of the Parasitic Mode Absorbers for the Frascaty  $\Phi$ -Factory RF Cavities // 1st Workshop on Microwave Absorbing Materials for Accelerators, Newport News, VA, Feb. 22–24, 1993; LNF-93/014 (P).
10. *Chao A. W. et al.* Handbook of Accelerator Physics and Engineering. Singapore: World Sci. Publ., 2023.
11. *Hanh H. et al.* HOMs of the SRF Electron Gun Cavity in the BNL ERL // Phys. Procedia. 2015. V. 79. P. 1–12.
12. *Weihreter E., Dürr V., Marhauser F.* A Ridged Circular Waveguide Ferrite Load for Cavity HOM Damping // Proc. EPAC 2006, Edinburgh, Scotland, 2006. P. 1280–1282. TUPCH114.

Получено 28 октября 2024 г.