

## ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

### РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДАВЛЕНИЯ ВОЛН ВЫСШЕГО ТИПА В УСКОРЯЮЩЕМ РЕЗОНАТОРЕ НА 350 МГц С ПОМОЩЬЮ ВОЛНОВОДНЫХ УСТРОЙСТВ ВЫВОДА МОЩНОСТИ

© 2022 г. Н. Ю. Самароков<sup>а</sup> \*, Я. В. Шашков<sup>а</sup>, М. В. Лалаян<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, 115409 Россия

\*E-mail: nikita.samarokov@gmail.com

Поступила в редакцию 19.07.2021 г.

После доработки 09.08.2021 г.

Принята к публикации 09.08.2021 г.

Рассмотрены два варианта подавления волн высшего типа (ВВТ) при помощи прямоугольных волноводов и гофрированных цилиндрических волноводов. Проведена их настройка, расчет электродинамических характеристик (ЭДХ) двух структур.

**Ключевые слова:** подавление ВВТ, ускоряющий резонатор, волноводные устройства вывода мощности

**DOI:** 10.56304/S2079562922010328

#### ВВЕДЕНИЕ

Для источников синхротронного излучения требуются большие значения токов пучка. Возбуждение ВВТ может привести к появлению многопучковых неустойчивостей, увеличению эммитанса пучков и обрыву тока пучка. Рассмотрены два варианта системы подавления ВВТ в резонаторах для накопительного кольца проекта ИСЦИ 4 [1, 2].

Для ускоряющего резонатора с рабочей частотой 350 МГц проведены расчеты электродинамических характеристик основной волны и ВВТ, а также предложены методики их подавления с помощью волноводных устройств вывода мощности. Общий вид ускоряющего резонатора без устройств вывода мощности представлен на рис. 1.

Зависимость продольного и поперечного шунтового сопротивления для монополярных и поперечных видов колебаний от частоты для ускоряющего резонатора на 350 МГц представлена на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что в ускоряющем резонаторе имеется большое число паразитных волн с шунтовыми сопротивлениями в диапазоне от  $10^4$ – $10^7$  Ом (Ом/м). Для снижения данных значений предложено добавить в систему устройства вывода мощности из структуры.

#### РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕМПФИРОВАНИЯ ВВТ В УСКОРЯЮЩЕМ РЕЗОНАТОРЕ НА 350 МГц С ПОМОЩЬЮ ВОЛНОВОДНЫХ УСТРОЙСТВ ВЫВОДА МОЩНОСТИ

В качестве начального варианта предложено использовать систему вывода мощности ВВТ анало-

гичную, примененной в ускорителе DAFNE (рис. 3) [3]. В данной конструкции имеются три волновода для вывода мощности, расположенных под углом 120 градусов друг по отношению к другу. Наличие трёх волноводов является необходимым условием для демпфирования всех поляризаций поперечных волн высшего типа.

В подобных системах дипольные и паразитные монополярные волны будут возбуждать в волноводе волну типа TE<sub>10</sub>. Длина широкой стенки резонатора будут определять частоту отсечки волны TE<sub>10</sub>. Длина узкой стенки оказывать влияния не будет. Частота отсечки должна быть выше 350 МГц (для

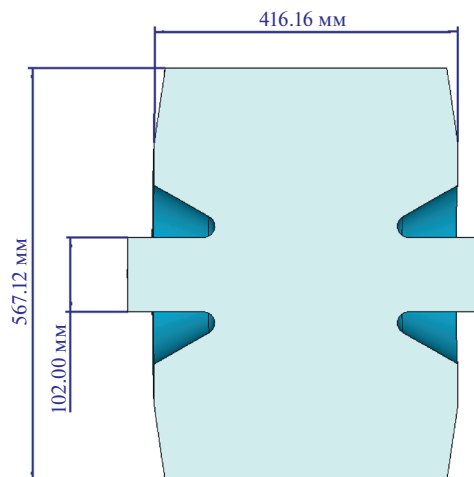
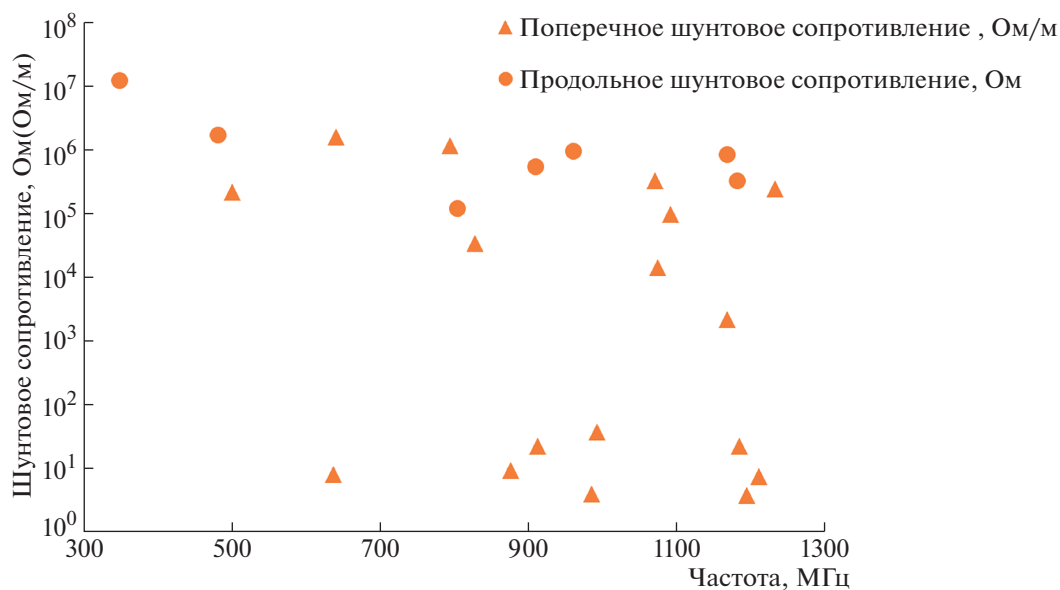
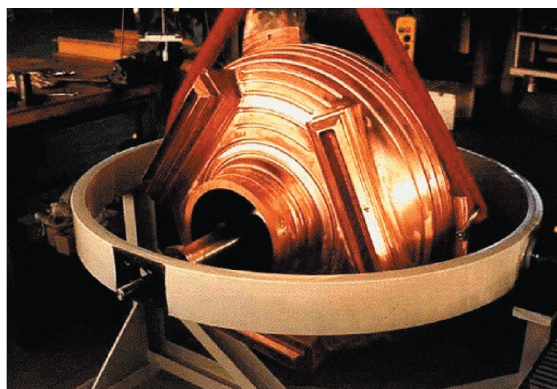
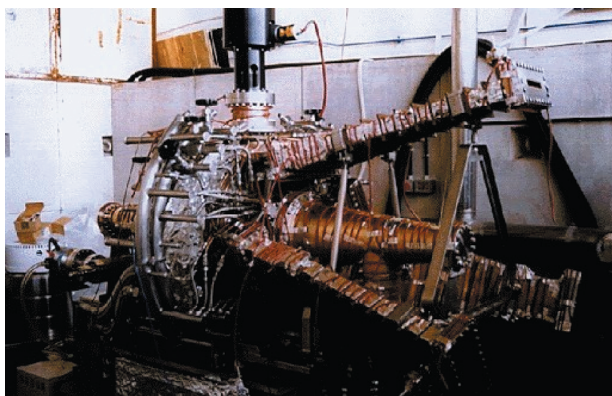


Рис. 1. Общий вид ускоряющего резонатора на 350 МГц.



**Рис. 2.** Зависимость продольного и поперечного шунтового сопротивления для монополярных и поперечных видов колебаний от частоты для ускоряющего резонатора на 350 МГц.



**Рис. 3.** Ускоряющий резонатор ускорителя DAFNE.

предотвращения демпфирования основной волны), но ниже 482 МГц (частота первой монополярной волны). Ширина волновода выбрана 340 мм, а толщина 10 мм.

При расчетах использовалась большая длина волноводов (1000 мм) для предотвращения затухания основной волны. Энергия основной волны экспоненциально затухает в волноводе, но при коротких длинах волновода часть мощности попадает в нагрузку, что приводит к снижению нагруженной добротности основной волны.

Зависимость продольного и поперечного шунтового сопротивления для монополярных и поперечных видов колебаний от частоты для ускоряющего резонатора на 350 МГц с устройствами вывода ВВТ и сравнение результатов демпфирования представлено на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что удалось значительно снизить значение поперечного и продольного шунтового сопротивления для большинства ВВТ.

#### РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕМПФИРОВАНИЯ ВВТ В УСКОРЯЮЩЕМ РЕЗОНАТОРЕ НА 350 МГц С ПОМОЩЬЮ ГОФРИРОВАННЫХ ВОЛНОВОДНЫХ УСТРОЙСТВ ВЫВОДА МОЩНОСТИ

В качестве следующего варианта системы вывода мощности ВВТ предложено использовать аналогичную примененной в BESSY и ESRF (рис. 6) [4, 5]. Данная конструкция предполагает три гофрированных волновода для вывода мощности, расположенных под углом 120 градусов друг по отношению к другу. Наличие трёх волноводов является

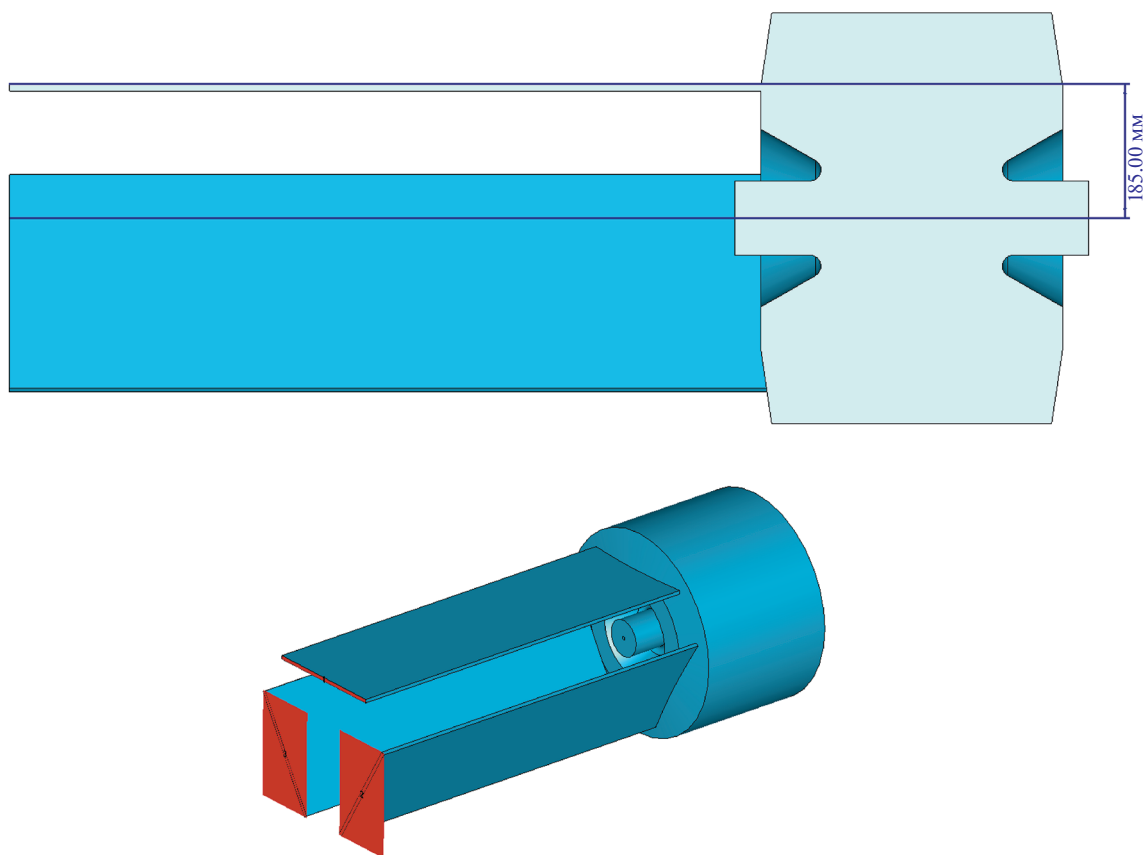


Рис. 4. Общий вид ускоряющего резонатора с тремя устройствами вывода ВВТ.

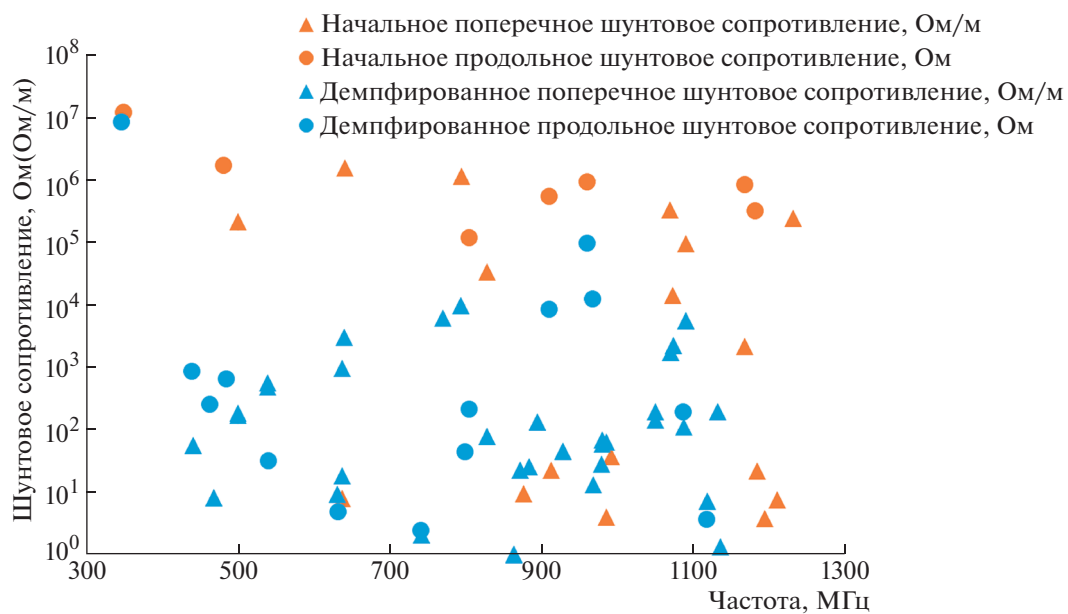


Рис. 5. Сравнение продольного и поперечного шунтового сопротивления для монопольных и поперечных видов колебаний от частоты для ускоряющего резонатора на 350 МГц без устройств вывода ВВТ и с устройствами вывода ВВТ.



Рис. 6. Ускоряющий резонатор ускорителя BESSY (слева) и ESRF (справа).

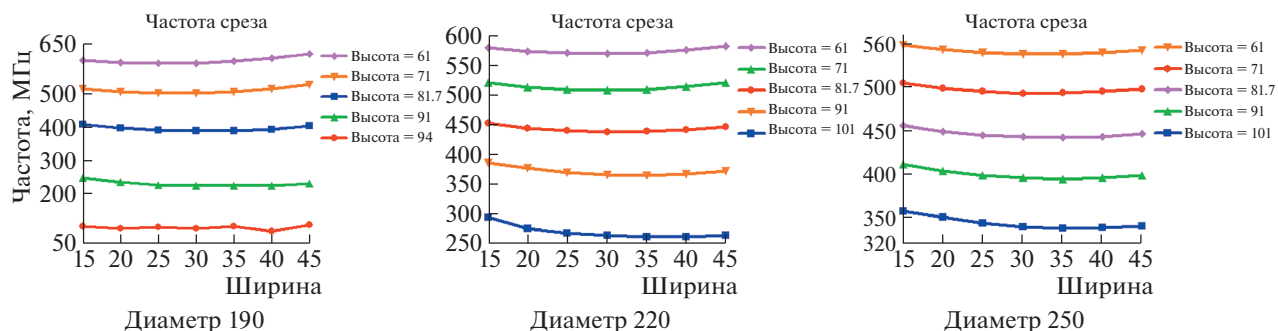


Рис. 7. Зависимость частоты отсечки волны от внешнего радиуса волновода, а также высоты и ширины гофра.

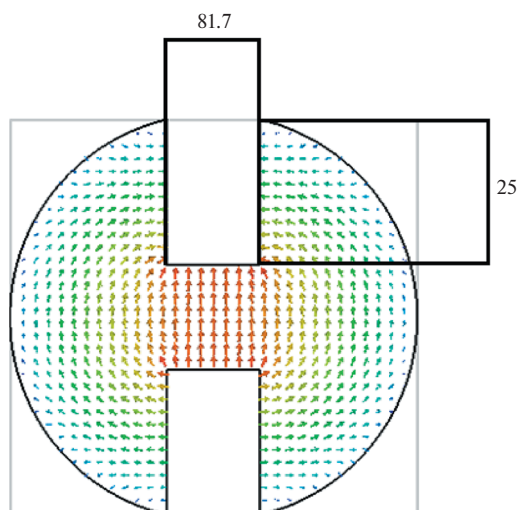


Рис. 8. Распределение волны TE11 в гофрированном цилиндрическом волноводе.

необходимым условием для демпфирования всех поляризаций поперечных волн высшего типа [6].

В подобных системах дипольные и паразитные монополярные волны будут возбуждать в волноводе волну типа TE10. Высота ребер гофрирования и диаметр волновода будут определять частоту отсечки волны TE10. Остальные параметры не оказывают существенного влияния на частоту отсечки. Частота отсечки должна быть выше 350 МГц (для предотвращения демпфирования основной волны), но ниже 442 МГц (частота первой монополярной волны). График зависимости частоты отсечки волны от внешнего радиуса волновода, а также высоты и ширины гофра приведен на рисунке рис. 7.

Диаметр волновода выбран 220 мм, высота гофрирования 81.7 мм, а их толщина 25 мм, так как при данных параметрах частота отсечки составляет 437 МГц.

При расчетах использовалась большая длина волноводов (1000 мм) для предотвращения зату-

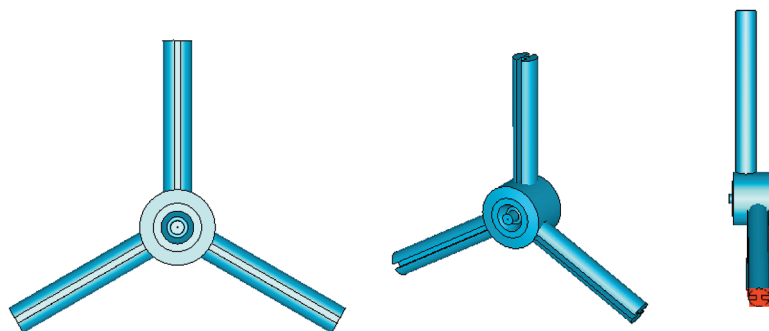


Рис. 9. Общий вид ускоряющего резонатора с тремя устройствами вывода ВВТ.



Рис. 10. Зависимость внешней добротности основной волны от длины волновода.



Рис. 11. Сравнение продольного и поперечного шунтового сопротивления для монопольных и поперечных видов колебаний от частоты для ускоряющего резонатора на 350 МГц без устройств вывода ВВТ и с устройствами вывода ВВТ.

хания основной волны. Энергия основной волны экспоненциально затухает в волноводе, но при коротких длинах волновода часть мощности попадает в нагрузку, что приводит к снижению нагруженной добротности основной волны. Зависимость внешней добротности основной волны от длины волновода показана на рис. 10.

Зависимость продольного и поперечного шунтового сопротивления для монополюсных и поперечных видов колебаний от частоты для ускоряющего резонатора на 350 МГц с устройствами вывода ВВТ и сравнение результатов демпфирования представлено на рис. 11.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оба способа позволяют подавить ВВТ. Однако они не дают полного подавления всех волн высшего типа, как видно из графиков в обоих случаях первый монополюсный вид колебания не подавля-

ется. В данный момент проводятся дальнейшие исследования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Polozov S.M. et al.* // Current Results of the 4th Generation Light Source USSR (Former SSRS4) Development. Proc. RuPAC2018. 2018.
2. *Polozov S.M. et al.* // Beam Dynamics Simulation Results in the 6-GeV Top-Up Injection Linac of the 4th Generation Light Source USSR. Proc. RuPAC2018. 2018. P. 285.
3. *Bartalucci S., Boni R., Gallo A.* // The RF Cavity for DAQNE. Proc. PAC1993. 1993. IEEE. P. 778.
4. *Weihreter E.* // The BESSY Higher Order Mode Damped Cavity. Proc. ESLS-RF Meeting. Sept. 2010. Trieste, Italy.
5. *Serrière V., Bandyopadhyay A.K., Triantafyllou A., Jacob J.* // Cavity Design Report. ESRFUP WP13.
6. *Shashkov Ya.V. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2014. V. 767. P. 271.

## Estimation of the Damping Efficiency of HOM in Accelerating Cavity at 350 Mhz Using Waveguide Couplers

N. Yu. Samarokov<sup>1, \*</sup>, Ya. V. Shashkov<sup>1</sup>, and M. V. Lalayan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

\*e-mail: nikita.samarokov@gmail.com

Received July 19, 2021; revised August 9, 2021; accepted August 9, 2021

**Abstract**—Two options for damping HOM using rectangular waveguides and corrugated cylindrical waveguides were considered. Tuning, calculation of the electrodynamic characteristics (EDC) of the two structures was conducted.

**Keywords:** damping of HOM, accelerating cavity, waveguide power output devices