

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО РЕЗОНАТОРА УСКОРИТЕЛЯ e-LINAC

*Р.О. Болгов<sup>1</sup>, М.А. Гусарова<sup>1</sup>, Р.А. Костин<sup>1</sup>, И.И. Петрушина<sup>1</sup>, Н.П. Собенин<sup>1</sup>,  
В.Л. Звягинцев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия;*

<sup>2</sup>*Canada's National Laboratory for Particle and Nuclear Physics, Vancouver, Canada*

*E-mail: sobenin@mail.ru*

Для 9-ячеечного сверхпроводящего резонатора типа TESLA исследована зависимость электродинамических характеристик волн высших типов в функции геометрических размеров конечных ячеек структуры и трубок пролётного канала пучка. Получены размеры, позволяющие ослабить влияние «запертых» мод. Проведены исследования мультипакторного разряда в тестовом одноячеечном резонаторе. Представлен результат расчёта смещения резонансной частоты рабочего вида колебаний из-за воздействия силы Лоренца на стенки резонатора.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из устройств нового ускорительного комплекса канадской лаборатории ядерной физики TRIUMF является линейный ускоритель электронов на энергию 50 МэВ с током 10 мА в непрерывном режиме (e-LINAC) [1]. В ускорителе предполагается использовать пять сверхпроводящих резонаторов, работающих на частоте 1,3 ГГц. Резонаторы по типу эллиптических резонаторов TESLA/ILC [2]. Ввод ВЧ-мощности осуществляется через два 60 кВт-каплера CPI [3]. Важной является проблема демпфирования волн высших типов (ВВТ), особенно последних четырех резонаторов, которые будут использоваться в режиме многократного прохождения пучка (режим ERL). Поэтому проведены исследования по оптимизации конечной ячейки резонатора и демпфированию волн высших типов. Исследовались также возможности недопущения развития мультипакторного разряда в структуре и проведена оценка влияния силы Лоренца на резонансную частоту. Эти исследования проведены в МИФИ в соответствии с меморандумом сотрудничества с TRIUMF.

### 1. ВОЛНЫ ВЫСШИХ ТИПОВ

На Рис.1,2 изображен 9-ячеечный резонатор ускорителя e-LINAC. Наличие трубок дрейфа на концах резонатора приводит к неравномерности электрического поля, поэтому геометрия концевых ячеек отличается от регулярной части. Высшие моды выводятся через вводы ВЧ-мощности, а также рассеиваются на демпфирующих кольцах из нержавеющей стали, расположенных на безопасном для основной моды расстоянии 117 мм от концевых ячеек.

Для оценки степени опасности ВВТ необходимо определить следующие характеристики: собственную добротность, отношение эффективного шунтового сопротивления к добротности, внешнюю добротность, нагруженную добротность (с учетом демпфирующих колец). Величина эффективного дипольного шунтового сопротивления служит в качестве меры воздействия высшей моды на ускоряемый пучок:

$$R_{o,load} = \frac{R_o}{Q_o} Q_{load}, \quad (1)$$

где  $Q_{load}$  – нагруженная добротность с учетом демпфирующих колец, вычисленная по формуле:

$$Q_{load} = \frac{1}{\frac{1}{Q_o} + \frac{1}{Q_{ext}} + \frac{1}{Q_{rings}}}, \quad (2)$$

где  $Q_o$  – собственная добротность моды;  $Q_{ext}$  – внешняя добротность;  $Q_{rings}$  – нагруженная добротность демпфирующих колец. Согласно ВВУ расчётам, наиболее опасными считались моды со значением эффективного шунтового сопротивления более  $10^7$  Ом.

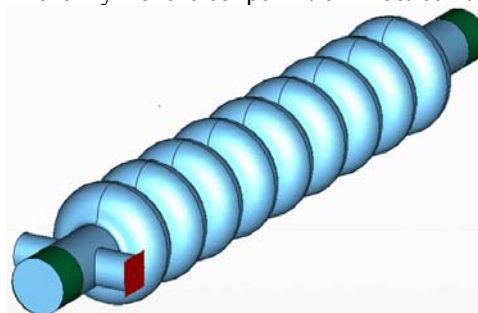


Рис.1. 9-ячеечный резонатор ускорительного комплекса e-LINAC

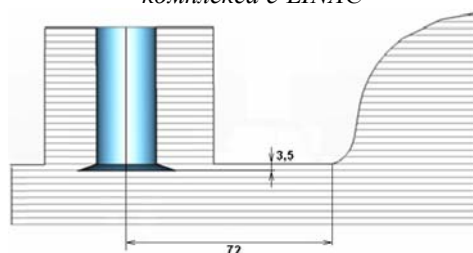


Рис.2. Положение каплера в трубке дрейфа резонатора

Дипольная мода  $TE_{11}$  частотой 2,56 ГГц оказалась запертой внутри структуры и близка ко второй гармонике ускоряющей волны.

Для вывода запертой дипольной моды было предложено изменять радиус диафрагмы концевой ячейки с противоположной устройству вывода ВВТ стороны и соответствующий радиус трубки дрейфа. Однако при этом изменяется собственная частота конечной ячейки, что приводит к ухудшению равномерности электрического поля на ускоряющей моде, поэтому необходимо производить дополнительную настройку для выравнивания поля. На-

стройка равномерности распределения ускоряющего поля проводилась на структуре, представленной на Рис.3, с использованием соответствующих граничных условий.

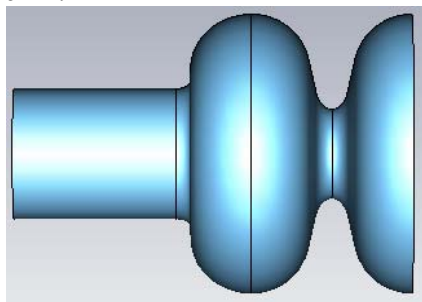


Рис.3. Макет для настройки ровности поля в концевых ячейках

Были проведены расчеты для запертой дипольной моды с частотой 2,56 ГГц (31-я мода при использовании плоскости симметрии Е-Н, Е-плоскость пересекает устройство вывода ВВТ). На Рис.4 представлено сравнение результатов по расчету эффективного шунтового сопротивления дипольных мод (с учетом и без учета демпфирующих колец) с результатами, полученными в лаборатории TRIUMF.

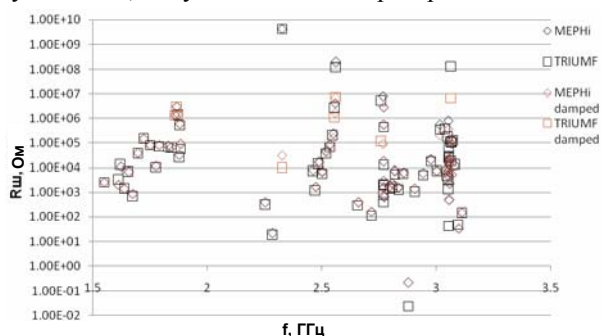


Рис.4. Сравнение результатов расчета эффективного шунтового сопротивления с результатами, полученными в лаборатории TRIUMF

В таблице представлены электродинамические характеристики рассматриваемой моды для различных радиусов трубки дрейфа. Видно, что при радиусе трубки дрейфа равном 39 мм удается снизить эффективное шунтовое сопротивление дипольной моды в 14 раз по сравнению с начальным значением 20 МОм.

Электродинамические характеристики запертой моды при изменении радиуса трубки дрейфа  $R_{bp}$

$R_{bp}$ , мм	39	48	54	64
$f$ , МГц	2558,7	2560,6	2560,7	2561,5
$Q_{load} \cdot 10^5$	1,68	2,99	2,71	3,09
$R_{ш}$ , МОм	2,90	20,50	17,60	21,50
$Q_{load}' \cdot 10^5$	0,81	2,94	2,56	2,99
$R_{ш}'$ , МОм	1,41	20,01	16,60	20,90

## 2. РАСЧЕТ МУЛЬТИПАКТОРНОГО РАЗРЯДА В ОДНОЯЧЕЕЧНОМ РЕЗОНАТОРЕ

На Рис.5. изображена геометрия ячейки эллиптического резонатора с обозначением размеров, а на Рис.6 – модель тестового одноячеечного резонатора с трубками дрейфа.

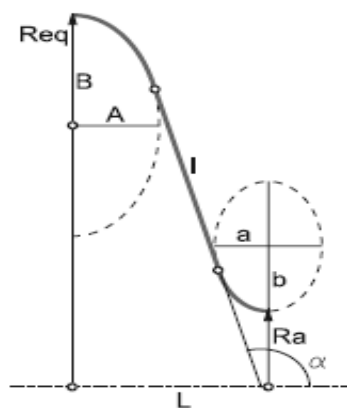


Рис.5. Обозначение размеров эллиптического резонатора

Резонатор на частоте 1,3 ГГц имеет следующие размеры:  $R_a = 39$  мм,  $R_{eq} = 103,3$  мм,  $L = 56,7$  мм,  $a = 9$  мм,  $b = 12,8$  мм,  $A = B = 43,0$  мм, длина трубок дрейфа в модели 50 мм.

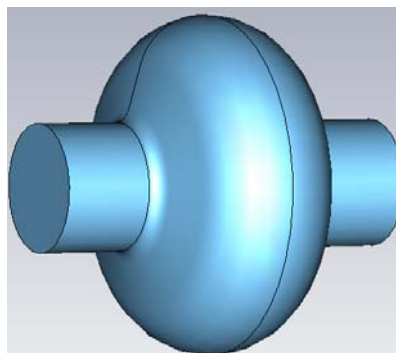


Рис.6. Модель эллиптического резонатора с трубками дрейфа

Для данного резонатора проведены расчеты мультипакторного разряда. Расчеты проводились с использованием программы трехмерного моделирования мультипакторного разряда MultP-M [4].

Обнаружена возможность возникновения мультипакторного разряда в области экватора ячейки в широком диапазоне ускоряющего поля. На Рис.7 представлен график зависимости процентного увеличения числа частиц от ускоряющего поля.

Следует отметить, что мультипакторный разряд возникает при небольших значениях электрического поля в области экватора ячейки, однако, на графике представлена зависимость возникновения мультипакторного разряда именно от значения максимального ускоряющего поля на оси структуры.

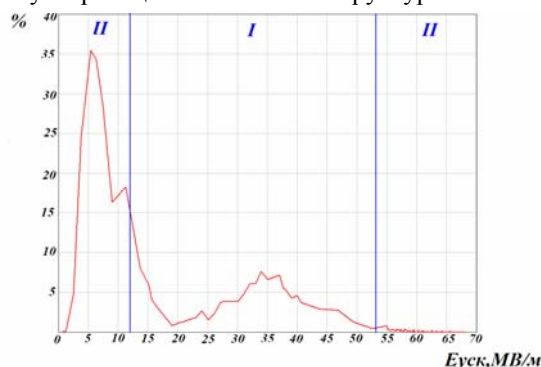


Рис.7. График зависимости процентного увеличения числа частиц от ускоряющего поля

Траектории, сохраняющиеся более 5 ВЧ-периодов, обнаруживаются при градиенте поля от  $E_{acc} \sim 0,46$  МВ/м. Максимум процентного увеличения числа электронов приходится на начальный уровень градиента ускоряющего поля  $\sim 5,04$  МВ/м. При ускоряющем поле 5...12 МВ/м наблюдаются мультипакторные траектории 2-4 порядка. При ускоряющем поле 12...53,5 МВ/м – мультипакторные траектории 1 порядка. При градиенте ускоряющего поля более 68,159 МВ/м мультипакторные траектории не наблюдаются.

На Рис.8. приведены примеры мультипакторных траекторий 1, 2 и 3 порядков.

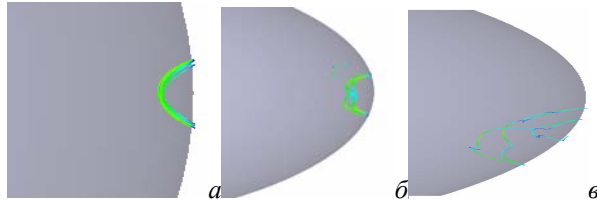


Рис.8. Примеры мультипакторных траекторий: а – 1 порядка; б – 2 порядка; в – 3 порядка

Порядком мультипакторного разряда называется число ВЧ-периодов, за которое электрон возвращается к поверхности. Наибольшую опасность представляют разряды с порядком до четвертого.

На Рис.9 представлен график зависимости энергии соударения электронов с поверхностью резонатора от ускоряющего поля.

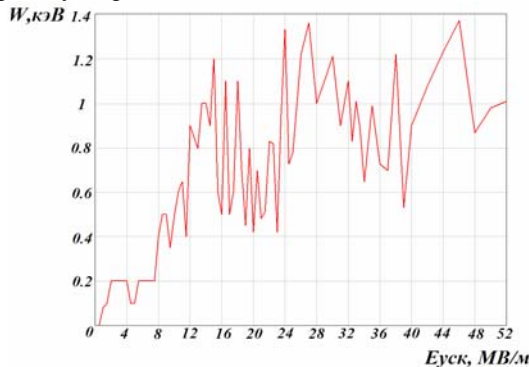


Рис.9. График зависимости энергии соударения электронов с поверхностью резонатора от ускоряющего поля

Из графика видно, что во всем диапазоне ускоряющего поля энергия соударения электронов с поверхностью составляет от 200 до 1500 эВ, что говорит о возможности развития мультипакторного разряда, так как в данном диапазоне энергий коэффициент вторичной электронной эмиссии может превышать 1.

### 3. РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИИ ОТ СИЛЫ ЛОРЕНЦА

За основу взята модель DESY [2]: толщина стенок резонатора 2,5 мм; кольца жёсткости закреплены на радиусе  $r = 54$  мм; коэффициент Пуассона  $\kappa = 0,388$ ; модуль Юнга  $E = 105,3$  ГПа; максимальное ускоряющее поле на оси  $E_{acc} = 25$  МВ/м. На Рис.10 представлена геометрия модели.

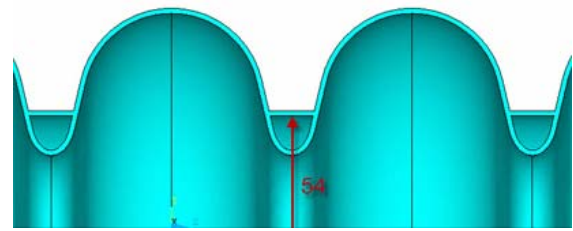


Рис.10. Геометрия модели

Модель построена в MWS с такой параметризацией, что радиус колец жёсткости можно изменять от 40 до 90 мм. Такая модель экспортирована в ANSYS. Так как электромагнитный расчёт даёт лишь соотношение между электрическими и магнитными полями, а также их распределение в пространстве, то проведено масштабирование результата до установленного уровня мощности (Рис.11). Модель рассчитана на частоту 1300 МГц.

Далее, в механическом модуле ANSYS к поверхностям резонатора приложено давление, вычисленное из полей после решения в электромагнитном модуле согласно формуле Лоренца:

$$P = 1/4(\epsilon_0 E^2 - \mu_0 H^2). \quad (3)$$



Рис.11. График зависимости продольной составляющей электрического поля от продольной координаты

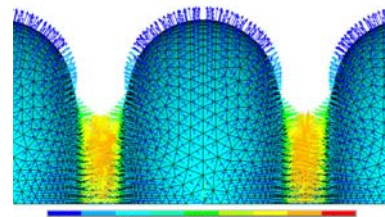


Рис.12. Распределение давления на стенке резонатора

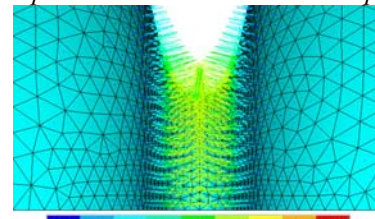


Рис.13. Распределение давления на стенке резонатора от электрического поля

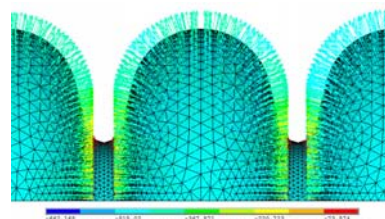


Рис.14. Распределение давления на стенке резонатора от магнитного поля



Приложенное к стенкам резонатора распределение электромагнитного давления представлено на Рис.12, а на Рис.13-14 электрическая и магнитная компоненты давления представлены отдельно. Магнитная компонента направлена наружу и раздувает ячейки, а электрическая – внутрь, и сжимает ячейки. Очевидно, что изменения частоты от изменений размеров этих двух областей частично компенсируют друг друга. Модель резонатора для расчёта деформации от силы Лоренца и результаты представлены на Рис.15-16. С одной стороны трубка дрейфа резонатора зафиксирована и неподвижна.



Рис.15. Деформация резонатора. Контур резонатора – недеформированный резонатор, размеченный сеткой – деформированный (не в формате)

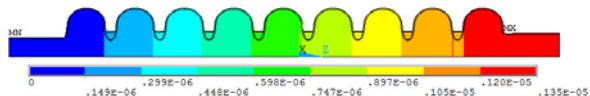


Рис.16. Распределение смещения резонатора

При значении ускоряющего градиента 25 МВ/м резонатор сжимается по длине на 1,35 мкм.

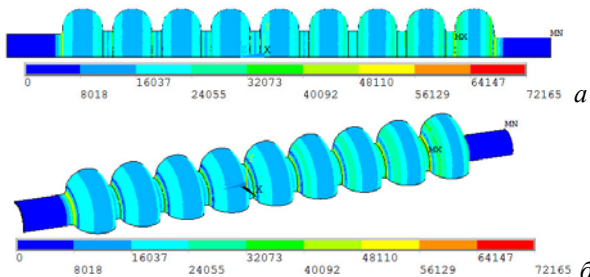


Рис.17. Распределение механических напряжений в структуре (Па)

В ходе структурного расчёта было определено смещение для каждого узла сетки, которая разбивает модель резонатора на элементы. Зная начальные координаты каждого узла (x,y,z), а также его смещения (dx,dy,dz), можно найти новое положение узла, вызванное деформациями структуры (x+dx, y+dy, z+dz). Прибавив к координатам каждого узла смещения для данного узла, можно получить изменённую геометрию модели резонатора. С изменённой геометрией

проведён электромагнитный расчёт и определено смещение резонансной частоты. Изначально частота была  $f = 1302,492503$  МГц, а частота деформированной структуры составила  $f = 1302,491998$  МГц. Сдвиг частоты в структуре, деформированной полем с ускоряющим градиентом 25 МВ/м, составил -505 Гц. Таким образом, коэффициент расстройки от силы Лоренца составил  $-505/25^2 = -0,808$  Гц/(МВ/м)<sup>2</sup>. Известно, что этот коэффициент должен быть меньше -3,6 Гц/(МВ/м)<sup>2</sup> [5].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для сверхпроводящей структуры e-LINAC рассчитаны запертые дипольные моды с большим поперечным эффективным шунтовым сопротивлением в широком частотном диапазоне. Для вывода из структуры запертой волны на частоте 2560 МГц предложен метод, позволивший в 14 раз снизить этот параметр. Проанализированы диапазоны изменения ускоряющего поля, в которых возможно возникновение мультипакторного разряда в резонаторе. При использовании конструкции криостата со сверхпроводящим резонатором типа TESLA нет опасности влияния силы Лоренца на изменение резонансной частоты.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. S. Koscielniac. An Electron Linac Photo-Fission Driver for the RARE // *SRF09*. Berlin, Germany, September 2009.
2. B. Aune, et al. Superconducting TESLA cavities // *Phys. Rev. ST Accel.* 2000, Beams 3, 092001.
3. V. Veshcherevich, et al. A High Power CW Input Coupler for CORNELL ERL Injector Cavities // *SRF*. 2009, p.722-725.
4. M.A. Gusarova, et al. Multipacting simulation in accelerator RF structure // *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A*, 2009, 599, p.100-105.
5. R. Mitchell, et al. Lorentz Force Detuning Analysis of the Spallation Neutron Source (SNS) Accelerating Cavities / *SRF-2001*. 2001, Tsukuba, Japan.

Статья поступила в редакцию 23.09.2011 г.

## RESEARCH OF e-LINAC ACCELERATOR SUPERCONDUCTING CAVITY

R. Bolgov, M. Gusarova, R. Kostin, I. Petrushina, N. Sobenin, V.Zvyagintsev

High order modes electrodynamic properties of TESLA-type 9 cell superconducting cavity proposed for e-LINAC were studied. End cells and drift tubes geometry influence on cavity EDCs was simulated. Cavity geometry was optimized in order to reduce trapped modes intensity. Multipactor discharge in cavity was simulated and studied. Lorenz force operating frequency detuning and mechanical deformations caused by it together with pressure variations were estimated.

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАДПРОВІДНОГО РЕЗОНАТОРА ПРИСКОРЮВАЧА e-LINAC

Р.О. Болгов, М.А. Гусарова, Р.А. Костін, І.І. Петрушина, М.П. Собенін, В.Л. Звягінцев

Для 9-секційного надпровідного резонатора типу TESLA досліджена залежність електродинамічних характеристик хвиль вищих типів у функції геометричних розмірів кінцевих комірок структури і трубок пролітного каналу пучка. Отримано розміри, що дозволяють послабити вплив «замкнених» мод. Проведені дослідження мультипакторного розряду в тестовому однокомірковому резонаторі. Представлено результат розрахунку зсуву резонансної частоти робочого виду коливаний через вплив сили Лоренца на стінки резонатора.