



Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»

Разработка и моделирование элементов резонансных ускоряющих структур методом эквивалентных схем

Специальность: 01.04.20

Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

С. В. Мациевский

Руководитель:

д. т. н., профессор

Н. П. Собенин

Москва, 2021

- 1 Обобщение выражений МЭС на случай связи ячеек УС как с соседними, так и с удалёнными ячейками; учёт устройств связи с подводящим трактом, соединительных трактов.
- 2 Разработка основанной на МЭС программы численного моделирования и оптимизации ЭДХ резонаторов и ЦСР.
- 3 Сравнение результатов расчётов УС различных конфигураций при помощи МЭС и МКЭ.
- 4 Численное моделирование и расчёт характеристик гибридного ЛУЭ, состоящего из группирователя на СВ и УС на БВ. Экспериментальное исследование характеристик макета группирователя на СВ.
- 5 Разработка и оптимизация параметров тестового и рабочего УВМ в СП полуволновый резонатор ускорительного комплекса с NICA.

- 1 Разработана программа расчёта УС с произвольными ЭДХ ячеек, построенная на основе МЭС, позволяющая моделировать УС на СВ и БВ с большим количеством ячеек с учётом связи как с соседними, так и с удалёнными ячейками; с учётом устройств связи с подводящим трактом, соединительных трактов.
- 2 Предложен и реализован метод моделирования переходных процессов в секциях на СВ и БВ с возможностью учёта связи с соседними и удалёнными ячейками.
- 3 Проведён анализ системы питания гибридного ЛУЭ с группирующей секцией на СВ и ускоряющей секцией на БВ при различных токах пучка и длинах секций. Сформулированы требования к секциям гибридного ЛУЭ, обеспечивающие устойчивую работу генератора.
- 4 Предложена схема УВМ в СП полуволновый резонатор с широким диапазоном рабочего тока пучка, обеспечивающая существенное снижение механических напряжений в керамическом СВЧ окне.

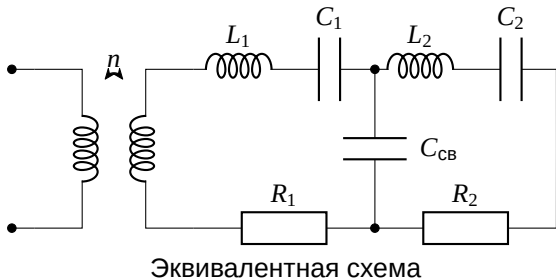
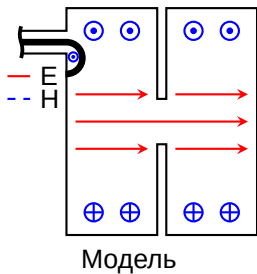
- 1 Разработанная и верифицированная программа численного расчёта резонаторов и ЦСР на СВ и БВ позволяет значительно ускорить разработку УЗЧ за счёт использования МЭС.
- 2 Обоснованы требования к системе питания гибридного ЛУЭ, состоящего из секций на СВ и БВ, обеспечивающие устойчивую работу установки. Использование рассмотренной схемы питания позволяет эффективно использовать СВЧ мощность за счёт сокращения времени заполнения секции на СВ мощностью.
- 3 Разработано УВМ для СП полуволнового резонатора коллайдера NICA. Устройство обеспечивает более эффективное, чем в устройствах с фиксированной антенной, использование СВЧ мощности. Предложенная конструкция со скользящими контактами снижает механические напряжения в керамическом СВЧ окне, тем самым повышая надёжность устройства. Разработанное устройство предполагается к использованию в инжекторе ионного коллайдера NICA.

- 1 Методика, алгоритм, выражения и программа для расчёта распределения ускоряющих полей, входных сопротивлений и переходных процессов ускоряющих структур различных типов с учётом связи соседних и удалённых ячеек, подводящих и соединительных трактов при помощи метода эквивалентных схем в секциях на стоячей и бегущей волнах.
- 2 Результаты верификации разработанной программы расчёта характеристик резонаторов и цепочек связанных резонаторов методом эквивалентных схем путём сравнения результатов моделирования с результатами моделирования в других программах. Результаты экспериментальной проверки расчётных результатов на макете группирователя на стоячей волне.

- 3 Результаты оценки требований к системе питания гибридного линейного ускорителя электронов, состоящего из секций на стоячей и бегущей волнах, обеспечивающих устойчивую работу СВЧ генератора на рабочей частоте секции. Результаты моделирования и оптимизации характеристик электронной пушки, группирователя на стоячей волне и ускоряющей секции на бегущей волне; расчёта динамики электронных пучков в них. Результаты экспериментального исследования и настройки макета группирователя на стоячей волне гибридного линейного ускорителя электронов.
- 4 Результаты электродинамического, теплового и механического моделирования, оптимизации параметров и настройки устройства ввода мощности в сверхпроводящий полуволновый резонатор для ионного инжектора коллайдера NICA.

- 1 **Метод эквивалентных схем**
 - Распределение полей и входное сопротивление
 - Переходные процессы
 - Дисперсионные характеристики
 - Волноводные соединения
- 2 **ЛУЭ гибридного типа**
 - Схема питания
 - Электронная пушка
 - Группирователь
 - Секция на бегущей волне
 - Измерения характеристик группирователя
- 3 **Ввод мощности в СП резонатор**
 - Параметры генератора
 - Рабочий ввод мощности
 - Мультипакторный разряд
 - Тестовый ввод мощности

Метод эквивалентных схем



$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & a_{N3} & \cdots & a_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix}$$

Система в общем виде

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & \cdots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix}$$

Упрощённый случай

Распределение ускоряющего поля в частотной области

$$a_{i,i} = 1 - \frac{f^2}{f_0^2} + j \frac{f}{f_0} \frac{1}{Q} (1 + \chi_r + \chi_n)$$

$$a_{i,j}^E = -\frac{K_{i,j}^E}{2}; \quad a_{i,j}^H = -\frac{K_{i,j}^H}{2} \frac{f^2}{f_0 f_j}$$

$$b_r = j4f \sqrt{\frac{\pi P_r \chi_r}{f_0 Q}} \exp(j\varphi)$$

Ёмкостное представление

$$a_{i,i} = 1 - \frac{f_0^2}{f^2} - j \frac{f_0}{f} \frac{1}{Q} (1 + \chi_r + \chi_n)$$

$$a_{i,j}^H = \frac{K_{i,j}^H}{2}; \quad a_{i,j}^E = \frac{K_{i,j}^E}{2} \frac{f_0 f_j}{f^2}$$

$$b_r = -j \frac{2}{f} \sqrt{\frac{f_0 P_r \chi_r}{\pi Q}} \exp(j\varphi)$$

Индуктивное представление

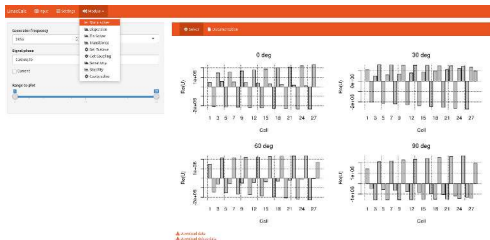
$$\hat{Z}_{\text{ВХ}} = \chi_{\text{Г}} \left[1 + \chi_{\text{Н}} + jQ \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} + \sum_{n=1}^N \left(\frac{f}{f_n} \frac{K_n^H}{2} + \frac{f_0}{f} \frac{K_n^E}{2} \right) \frac{\dot{X}_n^C}{\dot{X}^C} \right) \right]^{-1}$$

Ёмкостная нормировка

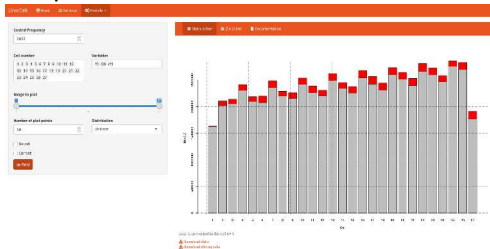
$$\hat{Z}_{\text{ВХ}} = \chi_{\text{Г}} \left[1 + \chi_{\text{Н}} + jQ \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} + \sum_{n=1}^N \left(\frac{f}{f_0} \frac{K_n^H}{2} + \frac{f_n}{f} \frac{K_n^E}{2} \right) \frac{\dot{X}_n^L}{\dot{X}^L} \right) \right]^{-1}$$

Индуктивная нормировка

- Написана на языке GNU R
- Web интерфейс реализован при помощи библиотеки Shiny
- Алгоритмы линейной алгебры BLAS и LAPACK написаны на Fortran
- Решатель ОДУ deSolve написан на C++
- Реализован алгоритм упрощения абстрактного дерева вызовов
- Не требовательна к ресурсам
- Имеет модульную структуру
- Свободно доступна по адресу <https://gitlab.com/matsievskiySV/linacalc/>



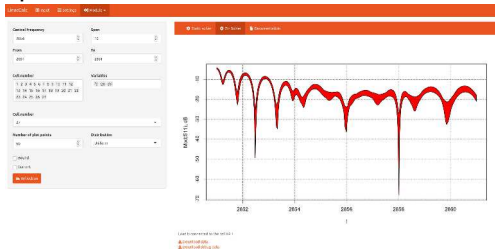
Распределение электрического поля



Чувствительность распределения поля

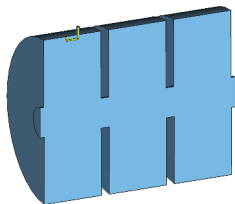


Входное сопротивление

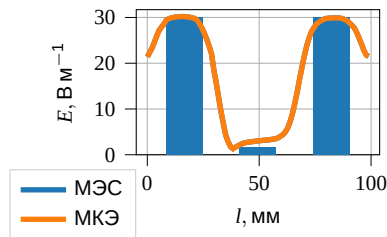


Чувствительность входного сопротивления

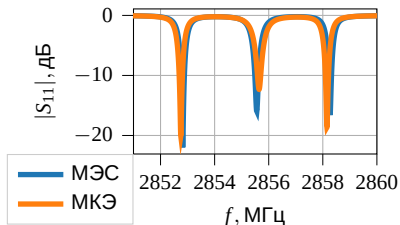
Сравнение результатов расчётов характеристик СВ



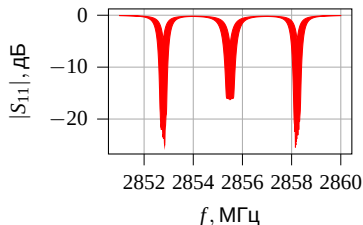
Макет



Распределение поля

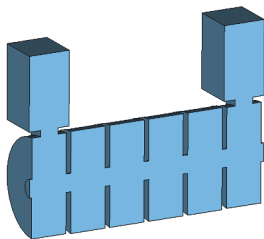


Входное сопротивление

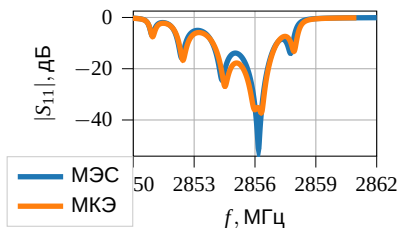


Чувствительность входного сопротивления

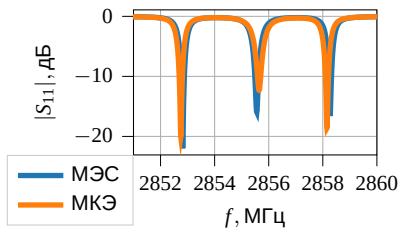
Сравнение результатов расчётов характеристик БВ



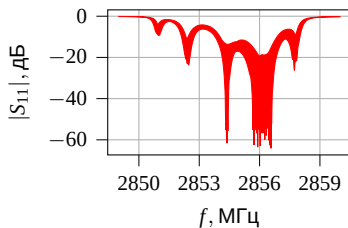
Макет



Распределение поля



Входное сопротивление



Чувствительность входного сопротивления

Распределение ускоряющих полей во временной области I

$$\sum_{n=1}^N \left(\frac{K_n^H}{2} \frac{f_0}{f_n} \frac{d^2 x_n}{dt^2} - 2\pi^2 K_n^E f_0^2 x_n \right) + \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{2\pi f_0}{Q_0} (1 + \chi_r + \chi_n) \frac{dx}{dt} - 4\pi^2 f_0^2 x + 8\pi f_0 f_r \sqrt{\frac{\pi f_0 P_r \chi_r}{Q_0}} \cos(2\pi f_r t + \varphi_0)$$

Ёмкостная нормировка

$$\sum_{n=1}^N \left(f_0 \frac{K_n^H}{2} \frac{d^2 x_n}{dt^2} - 2\pi^2 K_n^E f_0^2 f_n x_n \right) + \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{2\pi f_0}{Q_0} (1 + \chi_r + \chi_n) \frac{dx}{dt} - 4\pi^2 f_0^2 x - 4f_0 f_r \sqrt{\frac{\pi P_r \chi_r}{Q_0}} \cos(2\pi f_r t + \varphi_0)$$

Индуктивная нормировка

Распределение ускоряющих полей во временной области II

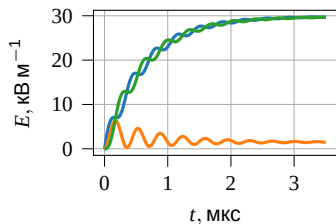
$$\begin{bmatrix} 1 & k_{1;2} & k_{1;3} & \cdots & k_{1;N-1} & k_{1;N} \\ k_{2;1} & 1 & k_{2;3} & \cdots & k_{2;N-1} & k_{2;N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \ddots & \cdots & \cdots \\ k_{N;1} & k_{N;2} & k_{N;3} & \cdots & k_{N;N-1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \cdots \\ \ddot{x}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1(\dot{x}, x, t) \\ g_2(\dot{x}, x, t) \\ \cdots \\ g_N(\dot{x}, x, t) \end{bmatrix}$$

$$[T] [\ddot{X}] = [G(i, t)] \rightarrow \begin{cases} [\dot{X}] = [Y] \\ [\dot{Y}] = [T^{-1}] [G(x, y, t)] \end{cases}$$

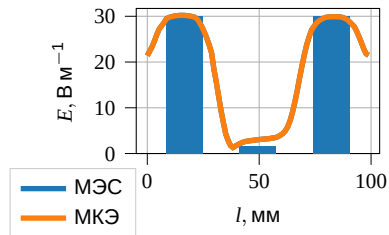


Распределение электрического поля во времени

Сравнение результатов расчётов характеристик



Временная область



Частотная область

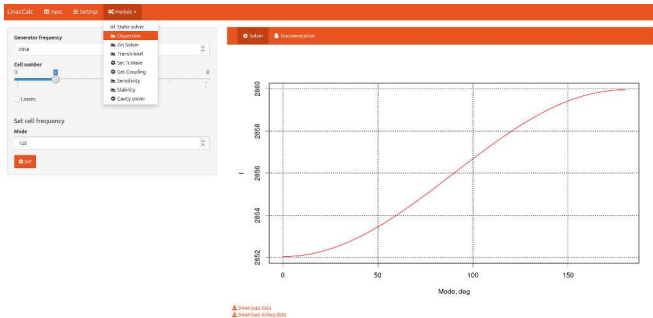
$$\frac{f}{f_0} = \sqrt{\frac{1 - K^E \cos \varphi}{1 + K^H \cos \varphi}}$$

Без потерь

$$\frac{f}{f_0} = \sqrt{\frac{1 - K^E \cos \varphi \cosh(\alpha D)}{1 + K^H \cos \varphi \cosh(\alpha D)}}$$

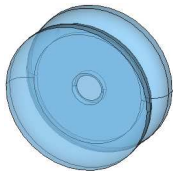
$$\begin{aligned} \cosh(\alpha D) = & \left[-(K^E - K^H) \cos \varphi \pm \left\{ (K^E - K^H)^2 \cos^2 \varphi + \right. \right. \\ & \left. \left. + 4(Q^2(K^E + K^H)^2 \sin^2 \varphi + K^E K^H \cos^2 \varphi) \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times (1 + Q^2(K^E + K^H)^2 \sin^2 \varphi) \right\}^{1/2} \right] \left[2Q^2(K^E + K^H)^2 \sin^2 \varphi + K^H K^E \cos^2 \varphi \right]^{-1} \end{aligned}$$

С потерями



Дисперсионная характеристика секции

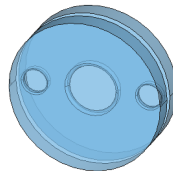
Сравнение результатов расчётов характеристик I



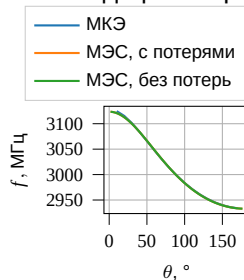
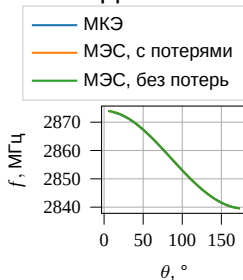
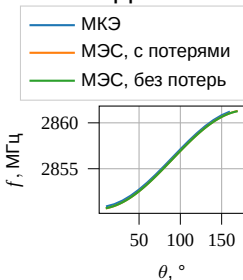
КДВ



КДВ-М

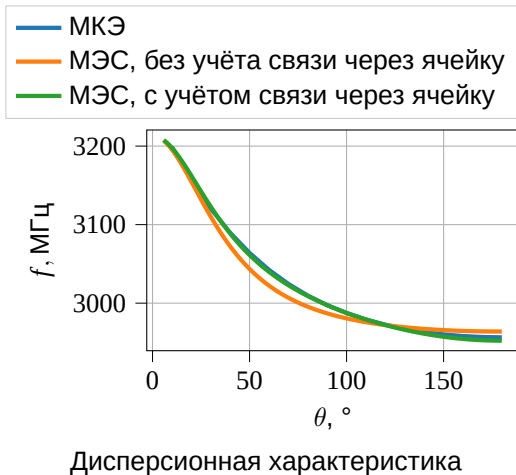


Ячейка дефлектора

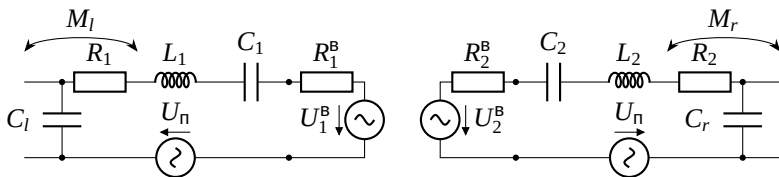


Дисперсионные характеристики

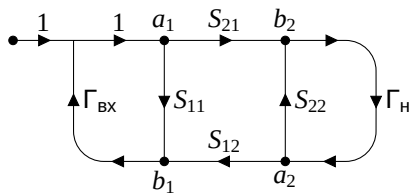
Сравнение результатов расчётов характеристик II



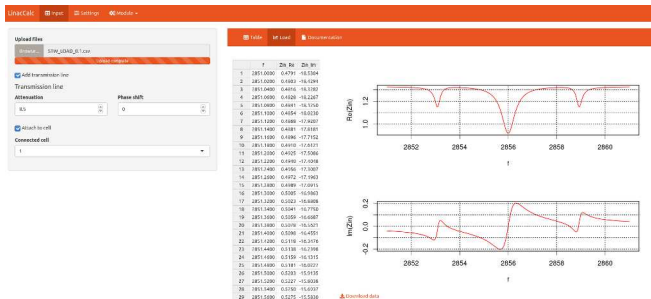
Анализ характеристик волноводных соединений методом внесённого сопротивления



Эквивалентная схема соединения



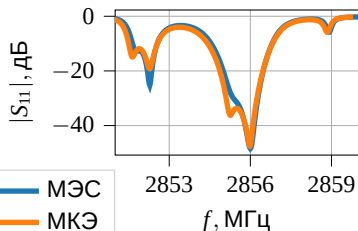
Ориентированный граф устройства



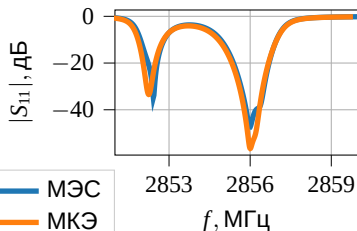
Нагрузка секции на комплексное сопротивление

Сравнение результатов расчётов характеристик

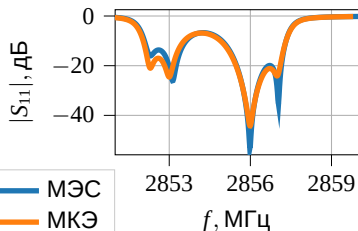
$\lambda = 1/4$



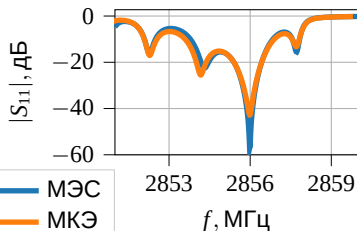
$\lambda = 1/2$



$\lambda = 3/4$



$\lambda = 1$



Линейный ускоритель электронов гибридного типа

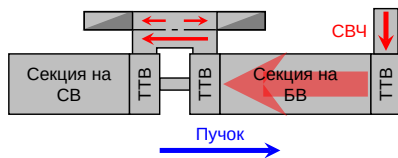
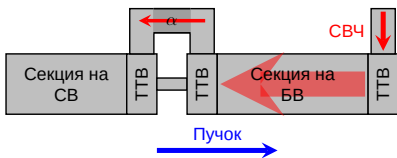
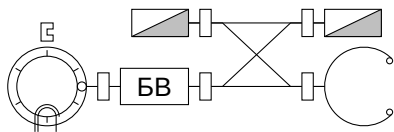
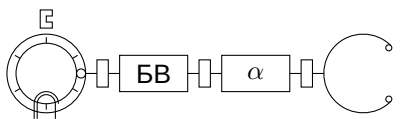
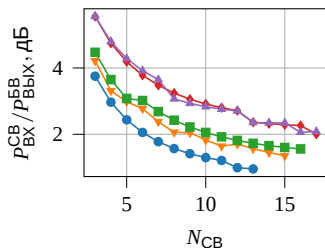
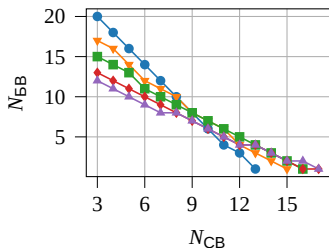


Схема с аттенюатором

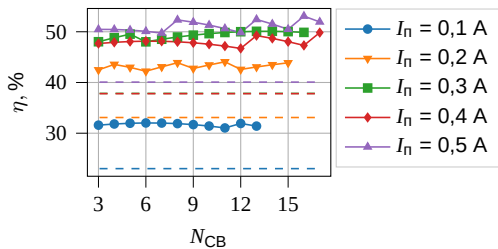
Схема с направленным
ответвителем

Энергетический баланс и баланс мощности

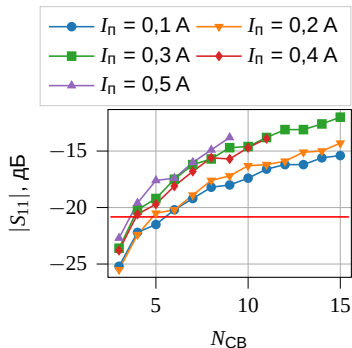


Количество ячеек в секциях

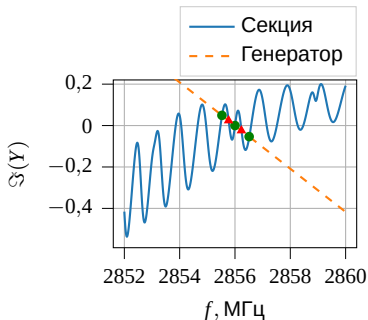
Затухание между секциями



КПД

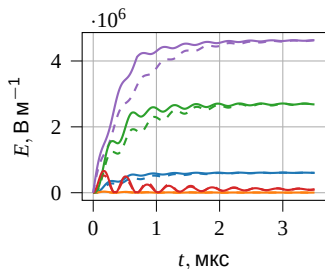


Отражение от секций ускорителя

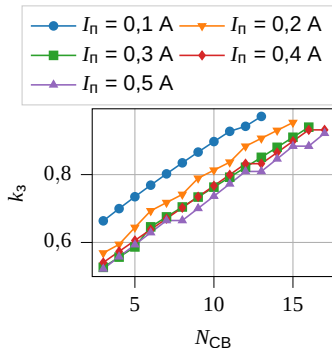


Характеристика устойчивости

Форсирование заполнения секции на СВ

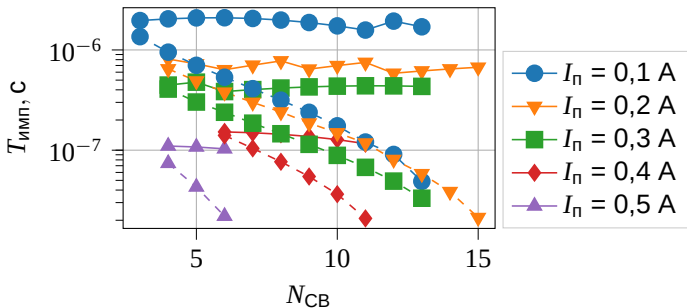


Переходной процесс в секции на СВ

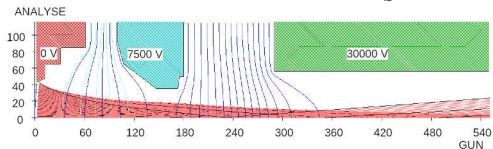
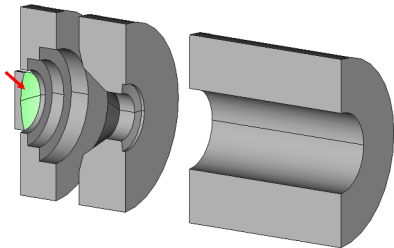


Коэффициент ускорения переходного процесса

Оптимальная величина импульса тока

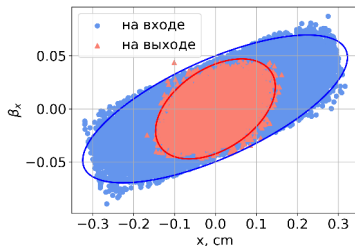
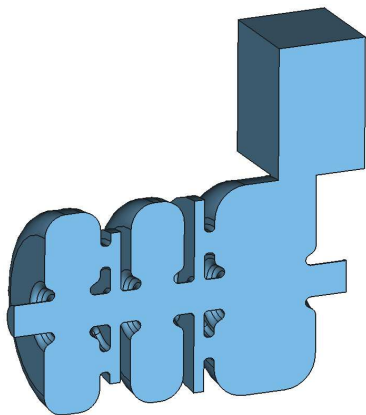


Область оптимальной длительности импульса тока



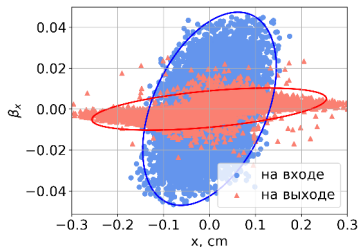
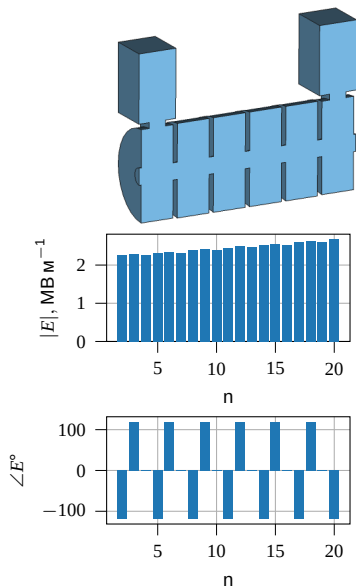
EGun

Параметр	Значение
α	-0,97
β , см рад ⁻¹	6,45
ϵ , см мрад	16,2
I , А	0,25

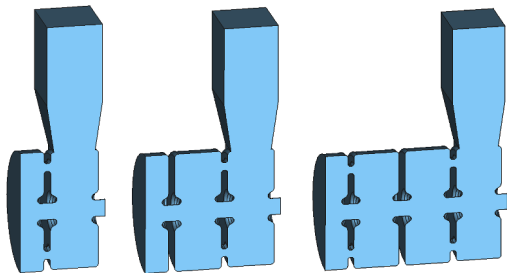


Параметр	Значение
$k_3, \%$	39
$I_{\text{вых}}, \text{A}$	0,1
$W_{\text{ср}}, \text{МэВ}$	0,96
α	-0,49
$\beta, \text{см рад}^{-1}$	3,46
$\epsilon, \text{см мрад}$	6,2

Секция на бегущей волне



Параметр	Значение
$k_3, \%$	97
$I_{\text{вых}}, \text{A}$	0,1
$W_{\text{ср}}, \text{МэВ}$	9,98
α	-0,57
$\beta, \text{см рад}^{-1}$	28,6
$\epsilon, \text{см мрад}$	2,3

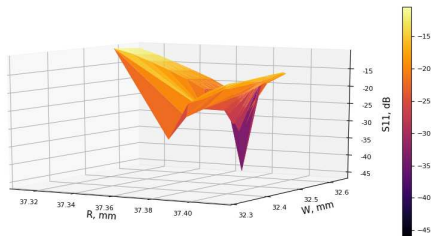


Разница между
оптимальными па-
раметрами МЭС и МКЭ

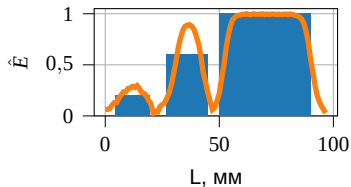
Параметр	Значение
----------	----------

Δf , MHz	0,88
------------------	------

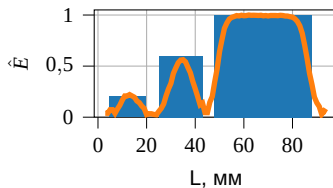
$\Delta \chi$, %	2,7
-------------------	-----



Измерения характеристик макета группирователя I

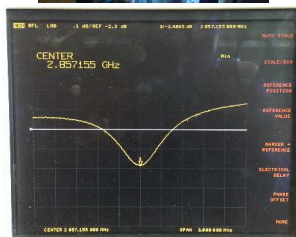


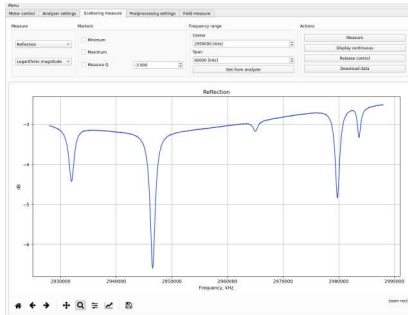
После изготовления



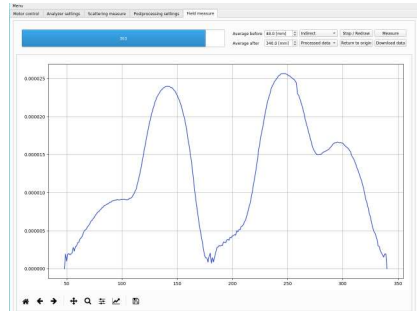
После настройки

Измерения характеристик макета группирователя II





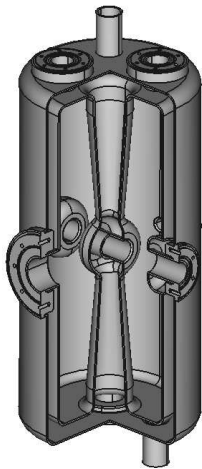
Отражение от устройства



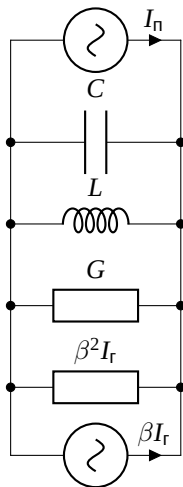
Распределение поля

<https://pypi.org/project/beadpull>

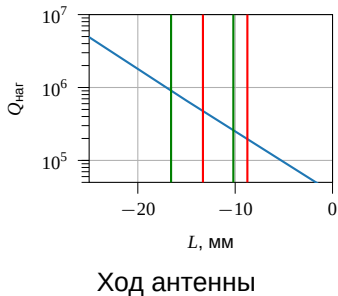
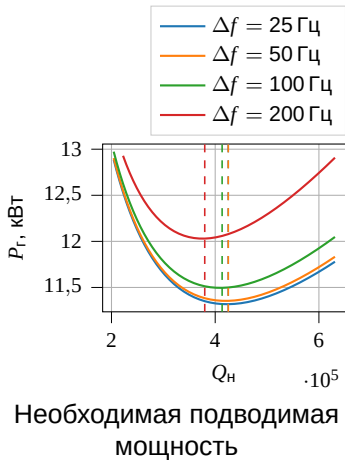
Ввод мощности в сверхпроводящий резонатор

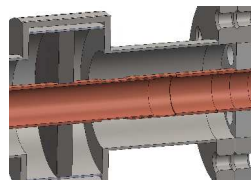
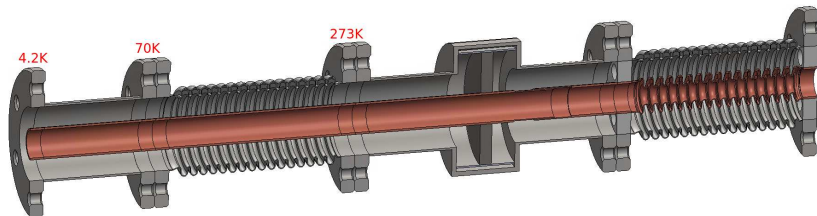


Полуволновый резонатор

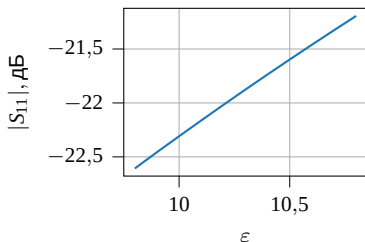


Эквивалентная схема

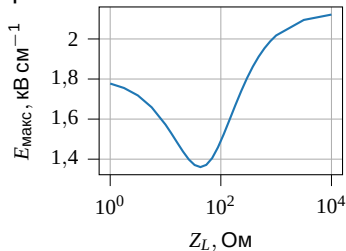
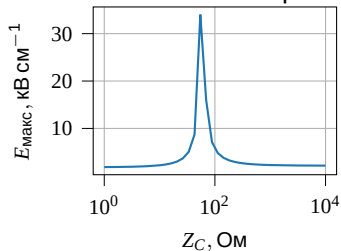




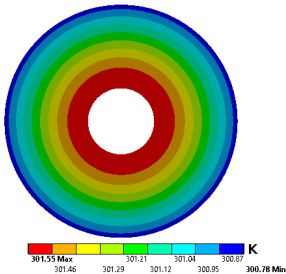
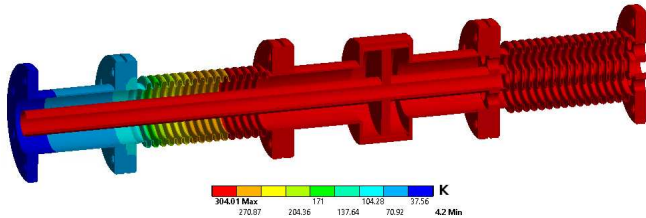
Скользящий
контакт



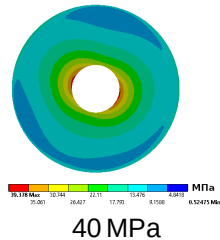
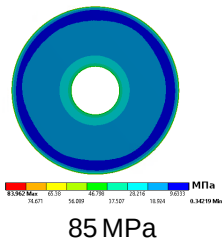
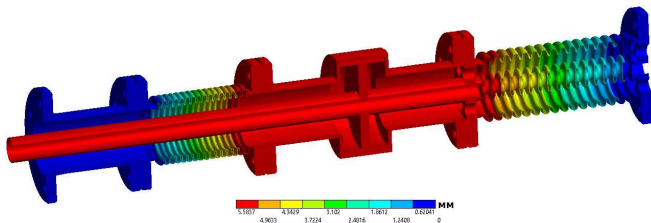
Отражение от устройства

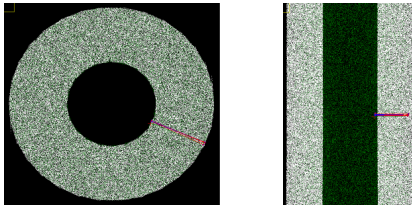


Максимальная напряжённость поля в керамическом окне

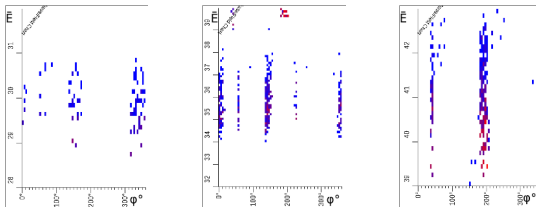


Контур охлаждения	Нагрузка, Вт
Статическая нагрузка	
4,2	0,6
70	2
Динамическая нагрузка	
4,2	0,05
70	0,7

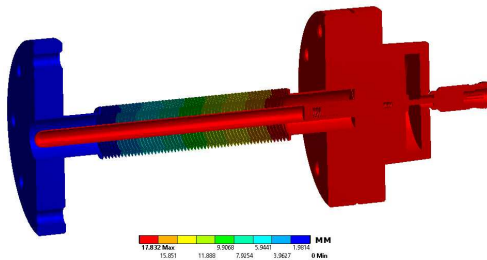
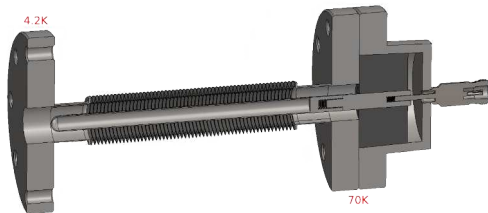




Стабильная траектория



Опасные уровни





- 1 Проведена проверка и обобщение представленных в литературе выражений анализа УС при помощи МЭС с учётом связи соседних и удалённых ячеек; подводных и соединительных трактов.
- 2 На основе анализа математической модели ЦСР получены выражения для моделирования переходных процессов в ускоряющих секциях на СВ и БВ с учётом связи соседних и удалённых ячеек.
- 3 Разработана программа математического моделирования УС с помощью МЭС.
- 4 Проведена проверка полученных выражений путём сравнения расчётов УС различных конфигураций с результатами моделирования другими программами.

- 5 Проведён анализ баланса мощностей и энергий в ЛУЭ, состоящем из группирователя на СВ и ускоряющей секции БВ, питающихся от одного СВЧ генератора. Определены условия устойчивой работы ускорителя. Разработаны и настроены трёхэлектродная электронная пушка, группирователь на СВ и секция на БВ. Измерены характеристики макета трёхячеечного группирователя на СВ, построенного на основе ячеек БУС. Рассчитана динамика электронов в ускорителе.
- 6 Определены требования к системе питания полуволнового СП резонатора. Разработаны УВМ для тестового и рабочего криостатов. Для обоих устройств проведены электродинамическое, тепловое и механическое моделирование; рассчитаны уровни возникновения мультипакторного разряда.

1. LinacCalc. / — С. В. Мациевский // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. Официальный бюллетень. — ФИПС, М., 2018. — 20 нояб. — № 2018664631.
2. Development of the QWR power coupler for the NICA injector. / — S. V. Matsievskiy, T. A. Lozeeva, [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. — 2018.
3. Investigation of the hybrid electron linac with negative group velocity. / — S. V. Matsievskiy, E. A. Savin, [et al.] // Journal of Physics : Conference Series. — 2016.
4. Combined generating-accelerating buncher for compact linear accelerators. / — S. V. Matsievskiy, E. A. Savin, N. P. Sobenin, [et al.] // Journal of Physics : Conference Series. — 2016.
5. Анализ высокочастотных дефлекторов на бегущей и стоячей волнах. / — С. В. Мациевский, А. Ю. Смирнов [и др.] // Вестник национального исследовательского ядерного университета МИФИ. — 2014.
6. *Matsievskiy, S. V.* — Input power coupler for NICA injector coaxial half wave SC cavity. / — S. V. Matsievskiy, M. A. Gusarova, M. V. Lalayan // Proc. of RUPAC'18 (Protvino). — 2018.
7. Low beta superconducting cavity for the new injector linac for Nuclotron – NICA. / — S. V. Matsievskiy [et al.] // Proc. of IPAC'17 (Copenhagen, Denmark). — 2017.
8. *Matsievskiy, S. V.* — Simulation of the transitional process in accelerating sections by equivalent circuit method. / — S. V. Matsievskiy, V. I. Kaminskiy, Ya. V. Shashkov // Proc. of LINAC'18 (Beijing, China). — 2018.

9. Input power coupler for NICA injector coaxial quarter wave SC cavity. / — S. V. Matsievskiy, T. A. Bakhareva, [et al.] // Proc. of SRF'17 (Lanzhou, China). — 2018.
10. *Matsievskiy, S. V.* — Three electrode electron gun with the decreased anode voltage geometry optimization. / — S. V. Matsievskiy, E. A. Savin // Proc. of RuPAC2014 (Obninsk). — 2016.
11. Hybrid electron linac with standing and travelling wave accelerating sections. / — S. V. Matsievskiy, E. A. Savin, [et al.] // Proc. of IPAC'16 (Busan, Korea). — 2016.
12. Electron beam dynamics calculation and accelerating structure geometry design in 10 MeV hybrid electron linac. / — S. V. Matsievskiy, E. A. Savin, [et al.] // Proc. of RuPAC'16 (St. Petersburg). — 2017.
13. Compact standing wave electron linac with the hybrid accelerating and power generation cell. / — S. V. Matsievskiy [et al.] // Proc. of IPAC'16 (Busan, Korea). — 2016.
14. *Matsievskiy, S. V.* — Traveling wave accelerating structure power input calculation with equivalent circuit method. / — S. V. Matsievskiy, V. I. Kaminskiy // Proc. of LINAC'16 (East Lansing, USA). — 2017.

- XXIX Linear Accelerator Conference (LINAC 18), Beijing, China, 2018;
- XVIII International Conference on RF Superconductivity (SRF 2017), Lanzhou, China, 2017;
- VIII International Particle Accelerator Conference (IPAC 17), Copenhagen, Denmark, 2017;
- XXVIII Linear Accelerator Conference (LINAC 16), East Lansing, MI USA, 2016;
- VII International Particle Accelerator Conference (IPAC 16), Busan, Korea, 2016;
- XXVI Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2018), Portvino, Russia, 2018.
- XXV Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2016), Saint-Petersburg, Russia, 2016;
- XXIV Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2014), Obninsk, Russia, 2014;

Спасибо за внимание!