

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.644

ПРОГРАММА РАСЧЕТА МОЩНОСТИ ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ УСКОРЯЮЩИХ РЕЗОНАТОРОВ

© 2026 г. С. В. Мациевский^а, М. В. Лалаян^а, М. А. Гусарова^{а, *}, И. Р. Калиева^а^аНациональный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, 115409 Россия

*E-mail: MAGusarova@mephi.ru

Поступила в редакцию 05.05.2025 г.

После доработки 15.05.2025 г.

Принята к публикации 30.05.2025 г.

Разработана программа расчета мощности генератора для сверхпроводящих ускоряющих резонаторов с учетом мощности потерь в стенках резонатора, нагрузки током пучка заряженных частиц и дополнительных расходами ВЧ мощности, вызванными смещениями частоты из-за колебаний давления гелия, микрофонного эффекта и из-за эффекта Лоренца. Программа входит в комплекс средств моделирования высокочастотных ускоряющих структур линейных ускорителей заряженных частиц, является модулем программного продукта LinacCalc.

Ключевые слова: SRF, сверхпроводящая радиочастота

DOI: 10.56304/S207956292601029X

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в рамках проекта NICA коллаборацией научных институтов России (ОИЯИ, Дубна; НИЯУ МИФИ, Москва), Республики Беларусь (ИЯП БГУ, Минск; ФТИ НАН Беларуси, Минск) и КНР (IMP, Китай, Ланьчжоу) проводится работа по созданию экспериментального стенда со сверхпроводящими резонаторами для линейного ускорителя ионов [1–12]. Изготовлены и проведены испытания на низком уровне мощности прототипы [13–15] и два опытных образца 325 МГц сверхпроводящих резонаторов на основе полуволновой коаксиальной линии [16, 17]. Разработка криомодуля на четыре резонатора проводится совместно с Институтом современной физики (IMP, Китай, Ланьчжоу).

Сверхпроводящие ускоряющие резонаторы позволяют обеспечивать высокие темпы ускорения заряженных частиц при низких, по сравнению с ускоряющими структурами с нормальной проводимостью, значениях высокочастотной мощности питания. Источник высокочастотного питания должен обеспечивать мощность достаточную для создания требуемого ускоряющего напряжения с учетом рассеивания тепла в стенках резонатора, нагрузки резонатора пучком ускоряемых заряженных частиц, а также потерь на отражение высокочастотной мощности в структуре, возникающих при работе вне режима согласования.

В работе рассмотрены вопросы расчета мощности источников питания для свехпроводящих ускоряющих резонаторов и представлены возмож-

ности, разработанного модуля программного продукта LinacCalc [18, 19], предназначенного для проведения таких вычислений.

1. РАСЧЕТ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ РЕЗОНАТОРОМ МОЩНОСТИ

Потребляемая резонатором мощность P_f определяется выражением (1):

$$P_f = \frac{V_c^2}{4 \frac{R_{sh}}{Q_0} Q_{ext}} \times \left\{ \left[1 + \frac{I_b \frac{R_{sh}}{Q_0} Q_{ext}}{V_c} \cos \varphi_s \right]^2 + \left[\frac{2Q_{ext} \delta \omega_m}{\omega} \right]^2 \right\}, \quad (1)$$

где V_c – напряжение на резонаторе, R_{sh} – шунтовое сопротивление резонатора; Q_0 – собственная добротность резонатора; Q_{ext} – внешняя добротность; I_b – ток пучка, φ_s – синхронная фаза, $\delta \omega_m$ – амплитуда смещения частоты, $\omega = 2\pi f$ – частота резонатора.

Частота f , собственная добротность Q_0 и шунтовое сопротивление резонатора R_{sh} определяются геометрией и свойствами материала. Рабочее ускоряющее напряжение V_c на резонаторе рассчитывается исходя из требований динамики пучка и составляет от сотен киловольт до единиц мегавольт.

Собственная добротность Q_0 резонатора определяется соотношением энергии, запасенной в резонаторе к мощности потерь, рассеиваемой в стенках резонатора. При расчете собственной добротности сверхпроводящих резонаторов необходимо учитывать дополнительно тот факт, что помимо уменьшения сопротивления материала при переходе в сверхпроводящее состояние происходит вытеснение магнитного поля и скин слой (толщина слоя металла по которому протекает поверхностный ток) становится пренебрежимо мал по сравнению с величиной скин слоя в нормально проводящем состоянии (в нормально проводящем состоянии скин слой составляет десятки и единицы микрон). Однако, геометрический фактор, определяемый как произведение поверхностного сопротивления R_s на величину собственной добротности Q_0 сохраняется (2). Исходя из этого можно записать соотношение (3) для вычисления собственной добротности сверхпроводящего резонатора с геометрии идентичной резонатору с нормальной проводимостью:

$$Q_{0[Cu]}R_{S_Cu} = Q_{0[Nb]}R_{S_Nb}, \quad (2)$$

$$Q_{0[Nb]} = \frac{Q_{0[Cu]}R_{S_Cu}}{R_{S_Nb}}. \quad (3)$$

Обычно сопротивление для ниобия R_{S_Nb} составляет от 100 до 10 нОм. Рекордно низкое зафиксированное сопротивление составило 1 нОм [20] и величина собственной добротности достигает значений порядка 10^9 . Так для 325 МГц резонатора на основе коаксиальной полуволновой линии, разработанного для экспериментального стенда в ОИЯИ [3–10] составляет $1.3 \cdot 10^9$ при $R_{S_Nb} = 10$ нОм, что на 5 порядков выше по сравнению с резонаторами с нормальной проводимостью.

Внешняя добротность Q_{ext} определяется потерями во внешних цепях и определяет выбор режима работы резонатора (недовязанный режим, режим согласования, перевязанный режим) и соответствующего коэффициента связи устройства ввода мощности. Нагруженная добротность Q_L – суммарными потерями в резонаторе и внешних цепях. Связь между нагруженной, собственной и внешней добротностями определяется выражением (4):

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{ext}}. \quad (4)$$

Соответственно нагруженную добротность можно определить соотношением (5):

$$Q_L = \frac{Q_0 Q_{ext}}{Q_{ext} + Q_0} = \frac{Q_0}{\left(1 + \frac{Q_0}{Q_{ext}}\right)} = \frac{Q_0}{(1 + \beta)}, \quad (5)$$

где β – коэффициент связи линии передачи мощности с резонатором – отношение собственной добротности резонатора к внешней добротности (6):

$$\beta = \frac{Q_0}{Q_{ext}}. \quad (6)$$

Можно выделить три режима работы резонатора в зависимости от величины коэффициента связи β : $\beta < 1$ – резонатор недостаточно связан с системой ВЧ питания (недосвязь); $\beta = 1$ – резонатор имеет критическую связь (режим согласования); $\beta > 1$ – резонатор перегружен (пересвязь).

Оптимальное значение внешней добротности Q_{ext} для ввода мощности резонатора в свою очередь так же определяется нагрузкой пучком (7):

$$Q_{ext} = \frac{V_c^2}{\frac{R_{sh}}{Q_0} I_b \cos \varphi_s}. \quad (7)$$

Обычно нагруженная добротность с учетом нагрузки пучком лежит в диапазоне от 10^5 до нескольких единиц 10^6 .

Помимо этого, важной величиной, которая входит в выражение (1), является $\delta\omega_m$ – амплитуда смещения частоты. Толщина стенок сверхпроводящих резонаторов составляет всего 2–4 мм, что делает резонатор восприимчивым к механическим деформациям, вызванным силой воздействия ускоряющего электромагнитного поля на стенки (сила Лоренца), колебаниями давления в окружающей гелиевой ванне и механическим вибрациям, вызванным внешними источниками механического шума (например насосами, транспортным и грузоподъемным оборудованием и т.д.). Механические деформации в свою очередь оказывают влияние на частоту резонатора. Таким образом, даже при отсутствии значительной нагрузки пучком необходимо учитывать величину смещения частоты $\delta\omega_m$, обусловленную механическими смещениями, вызванными внешними факторами.

Для определения возможных значений смещения частоты $\delta\omega_m$ с использованием пакетов программ трехмерного моделирования физических процессов (электродинамических, тепловых, механических) проводят расчеты чувствительности частоты к изменению давления гелия, чувствительности частоты к механическим смещениям, возникающим из-за деформаций, вызываемых давлением высокочастотного поля на стенки резонатора (эффект Лоренца), расчет собственных мод механических колебаний из-за внешних вибраций оборудования. Снижение чувствительности частоты к внешним механическим вибрациям и колебаниям давления гелия может быть обеспечено на этапе проектирования резонатора за счет дополнительных ребер жесткости. В рабочем режиме для минимизации влияния смещения ча-

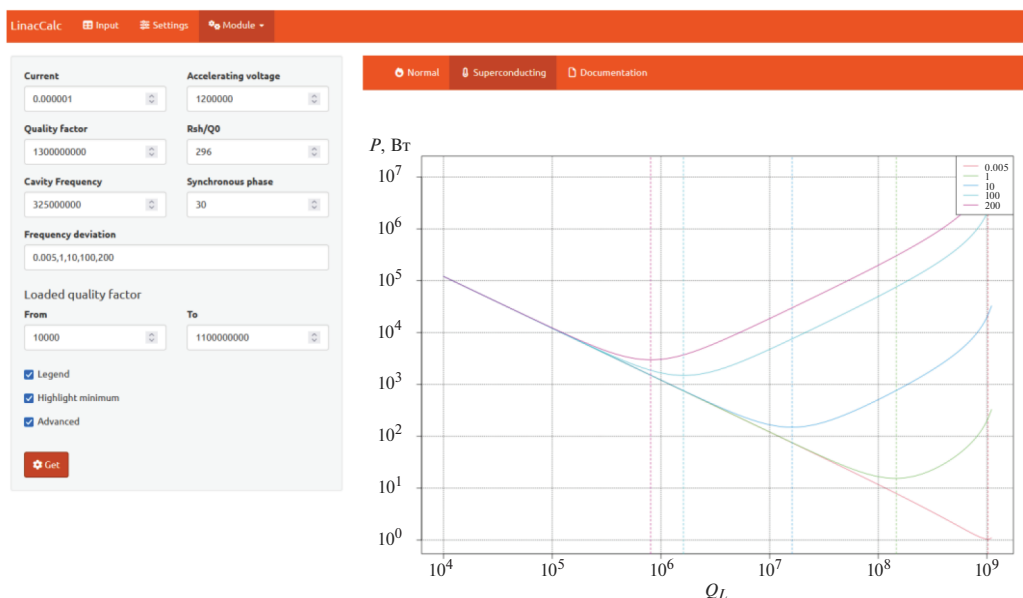


Рис. 1. Интерфейс программы расчета мощности генератора для сверхпроводящих ускоряющих резонаторов.

стоты из-за внешних вибраций используют системы подстройки частоты на основе пьезоэлементов, обеспечивающих быструю подстройку [21].

2. LinacCalc ДЛЯ РАСЧЕТА МОЩНОСТИ ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ УСКОРЯЮЩИХ РЕЗОНАТОРОВ

Разработанный модуль программы позволяет получить графики требуемой мощности питания P_f в зависимости от величины нагруженной добротности резонатора Q_L с учетом величины собственной добротности резонатора, величины нагрузки пучком заряженных частиц, требуемого ускоряющего напряжения, а так же учесть влияние возможных дополнительных потерь, обусловленных потерями из-за смещения собственной резонансной частоты ускоряющей структуры из-за внешних колебаний.

На рис. 1 приведен интерфейс программы и графики зависимости требуемой мощности питания сверхпроводящего 325 МГц резонатора на основе полуволновой коаксиальной линии, разработанного для экспериментального стенда со сверхпроводящими резонаторами для линейного ускорителя ионов, создаваемого в ОИЯИ в рамках проекта NICA. Расчетное значение собственной добротности резонатора $Q_0 = 1.3 \cdot 10^9$. Отношение шунтового сопротивления к собственной добротности $R_{sh}/Q_0 = 296$. На графиках показана зависимость требуемой мощности питания в зависимости от нагруженной добротности резонатора при токе ускоряемого пучка 1 мкА при пяти значениях смещения резонансной частоты:

тысячная доля Герц (смещение отсутствует), 1, 10, 100 и 200 Гц.

Из графиков видно, что без нагрузки пучком (ток 1 мкА) и при отсутствии смещения резонансной частоты ускоряющей структуры (смещение 0.005 Гц) величина внешней добротности стремиться к расчетному значению собственной добротности резонатора, а мощность питания для достижения ускоряющего напряжения на резонаторе 1.2 МВ составляет единицы Ватт. При расстройке частоты в 10 Гц величина нагруженной добротности на уменьшается на два порядка, а требуемая мощность питания увеличивается до 200 Вт. При расстройке частоты в 100–200 Гц мощность питания резонатора без нагрузки должна составлять уже единицы киловатт. Нагруженная добротность резонатора при этом на два порядка выше по сравнению с резонаторами с нормальной проводимости, однако на 3 порядка ниже, чем могла бы быть в условиях отсутствия расстройки по частоте.

С использованием разработанного модуля так же получены графики зависимости мощности питания P_f от величины нагруженной добротности резонатора Q_L для того же 325 МГц резонатора на основе полуволновой коаксиальной линии при токе ускоряемого пучка 1, 5 и 25 мА (рис. 2). Из графиков видно, что: при токе пучка 1 мА и напряжении на резонаторе 1.2 МВ смещение частоты в 200 Гц требует увеличения мощности питания втрое с 1.2 до 3.55 кВт; при токе пучка 5 мА на 18% с 6 до 7.3 кВт; при токе 25 мА доли процентов — с 30 до 30.3 кВт. С увеличением нагрузки током пучка, компенсация смещения частот в десятки и

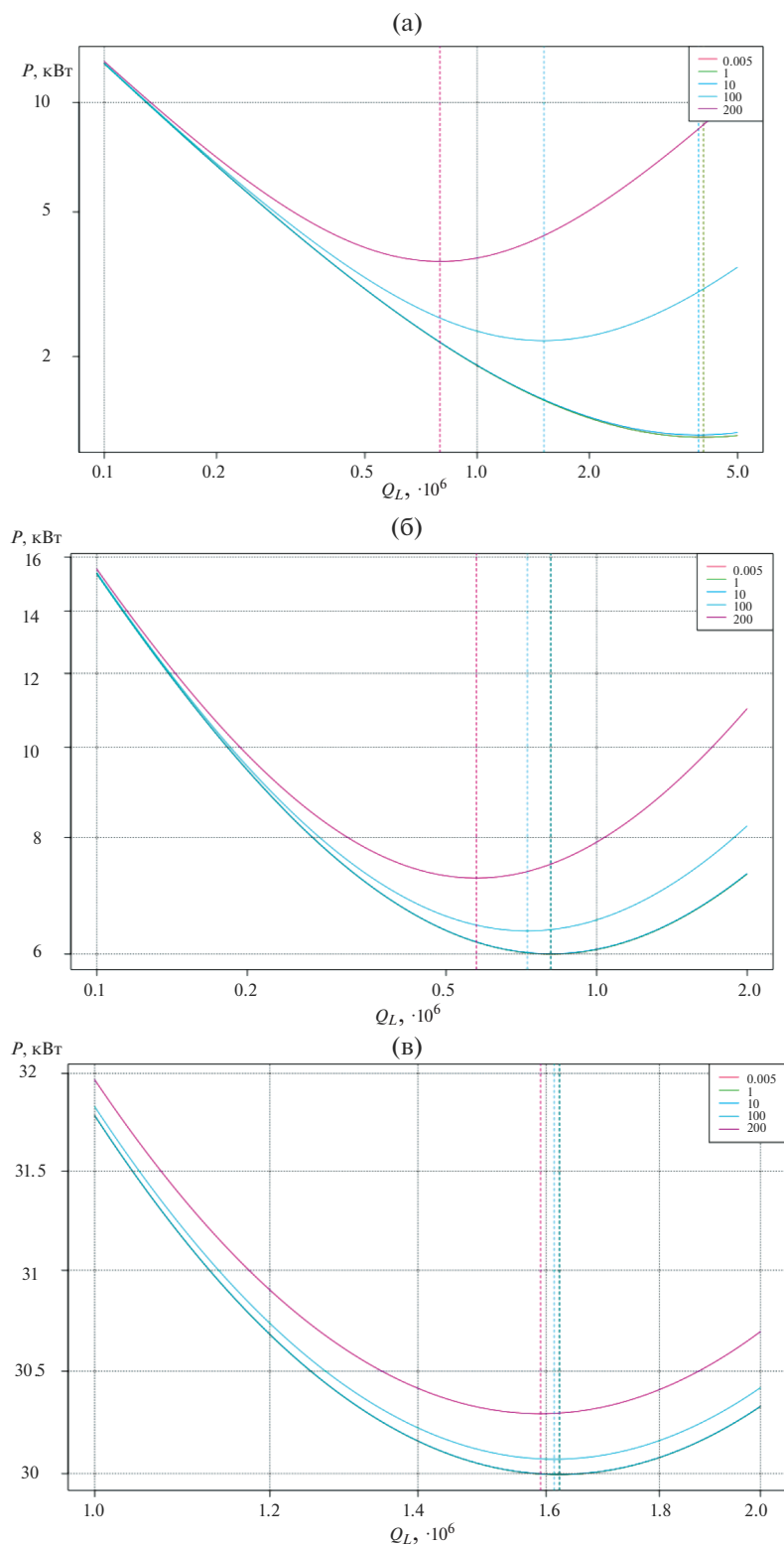


Рис. 2. Графики зависимости мощности питания P_f от величины нагруженной добротности резонатора Q_L для 325 МГц резонатора на основе полуволновой коаксиальной линии экспериментального стенда со сверхпроводящими резонаторами для линейного ускорителя ионов при токе ускоряемого пучка: (а) 1; (б) 5; (в) 25 мА

сотни Гц не оказывают такого значительного влияния как в случае с малой нагрузкой резонатора током пучка.

Таким образом показано, что при ускорении пучков с различными значениями тока пучка, при проектировании целесообразно закладывать использование устройства ввода мощности с возможностью перестройки коэффициента связи [22–25], обеспечивающим за счет настройки режим согласования и работу с минимальными потерями. При использовании ввода мощности без возможности изменения коэффициента связи следует выбирать источник питания большей мощности, позволяющий за счет работы в режиме «пересвязи» обеспечить требуемое ускоряющее напряжение.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная программа позволяет проводить оценку требуемой мощности генератора для сверхпроводящих резонаторов, на эффективность работы которых существенное влияние оказывают помимо смещения частоты из-за нагрузки пучком так же, из-за их конструктивных особенностей, и смещение частоты из-за внешних вибраций. В программе реализована возможность изменения величины тока пучка, требуемого ускоряющего напряжения, собственной добротности резонатора, отношения шунтового сопротивления в величине собственной добротности, частоты резонатора, значения синхронной фазы частицы и значения возможного суммарного смещения частоты из-за внешних факторов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Программа разработана в рамках проведения работ по созданию экспериментальной секции со сверхпроводящими резонаторами (325 МГц) линейного ускорителя инжекционного комплекса проекта NICA в рамках выполнения проекта Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, проект “Фундаментальные и прикладные исследования на экспериментальном комплексе класса мегасайенс NICA (ОИЯИ)” № FSWU-2025-0014 при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Trubnikov G.V. et al.* New Superconducting Linac Injector Project for Nuclotron-Nica: Current Results. Proc. RuPAC'16 Conf. St. Petersburg, Russia. 2016. Russian Particle Accelerator Conference. 2017. Geneva: JACoW. V. 25. P. 626–628. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2016-THP-SC04>.
2. *Butenko A.V. et al.* QWR Resonator Cavities Electrodynamics Simulations for New Nuclotron-NICA Injector. Proc. RuPAC'16. Conf. St. Petersburg, Russia. 2016. Russian Particle Accelerator Conference. 2017. Geneva: JACoW. V. 25. P. 273–275. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2016-TUP-SA028>.
3. *Batouritski M.A. et al.* The Perspective of JINR LU-20 Replacement by a Superconducting LINAC. in Proc. IPAC2016. Conf. Busan, Korea. 2016. International Particle Accelerator Conference. 2016. Geneva: JACoW. V. 7. P. 944–946. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2016-MOPOY042>
4. *Taletskiy K. et al.* RF design of 324 MHz Superconducting (SC) CH Cavity for 0.21 Beta. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 941. P. 012088. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/941/1/012088>
5. *Gusarova M.A. et al.* Low Betta Superconducting Cavity for the New Injector Linac for Nuclotron-NICA. Proc. IPAC2017. Conf. Copenhagen, Denmark. 2017. International Particle Accelerator Conference. 2017. Geneva: JACoW. V. 8. P. 1058–1060. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2017-MOPVA087>
6. *Gusarova M.A. et al.* Medium Betta Superconducting Cavity for the New Injector Linac for Nuclotron-NICA. Proc. IPAC2017. Conf. Copenhagen, Denmark. 2017. International Particle Accelerator Conference. 2017. Geneva: JACoW V. 8. P. 1061–1063. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2017-MOPVA088>
7. *Gusarova M.A. et al.* Selection of the Type of Accelerating Structures for the Second Group of Cavity SC LINAC Nuclotron-NICA. Proc. SRF2017. Conf. Lanzhou, China. 2017. International Conference on RF Superconductivity. 2018. Geneva: JACoW. V. 18. <https://doi.org/10.18429/JACoW-SRF2017-MOPB034>
8. *Butenko A.V. et al.* Status of R&D on New Superconducting Injector LINAC for Nuclotron-NICA. Proc. IPAC2017. Conf. Copenhagen, Denmark. 2017. International Particle Accelerator Conference. 2017. Geneva: JACoW. V. 8. P. 3282–3284. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2017-WEPVA014>
9. *Bakinovskaya A.A. et al.* A New Superconducting Linac for the Nuclotron–NICA Facility: Progress Report // Phys. Part. Nucl. Lett. 2018. V. 15 (7). P. 831–834.
10. *Butenko A.V. et al.* Status of R&D on New Superconducting Injector LINAC for Nuclotron-NICA. Proc. HB2018. Conf. Daejeon, Korea. 2018. ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop. 2018. Geneva: JACoW. V. 61. P. 83–85. <https://doi.org/10.18429/JACoW-HB2018-TUA2WC02>
11. *Butenko A.V. et al.* Status of the SC HWR Cavities Production for NICA Project. Proc. RuPAC2021. Conf. Alushta, Russia. 2021. Russian Particle Accelerator Conference. 2021. Geneva: JACoW. V. 27. P. 85–87. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-THA01>
12. *Lalayan M.V. et al.* Experimental 325 MHz Section with Superconducting Cavities of LINAC for the Injection Facility of the NICA Project // Phys. Part. Nucl. Lett. 2025. V. 22 (4). P. 641–645.
13. *Bychanok D. et al.* Electromagnetic Properties Control During Prototyping, Fabrication and Operation of Low- β 325 MHz Half-wave Resonators // J. Phys. D: Appl. Phys. 2021. V. 54. P. 255502. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/abf168>

14. *Bychanok D. et al.* Design, Characteristics and Dynamic Properties of Mobile Plunger-based Frequency Tuning System for Coaxial Half Wave Resonators. Proc. IPAC2021 Conf. Campinas, SP, Brazil. 2021. Geneva: JACoW. V. 12. P. 1129–1131. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-MOPAB363>
15. *Bychanok D. et al.* Comparison of Electromagnetic Properties During Fabrication of Copper and Niobium Prototypes of 325 MHz Coaxial Half-wave Resonator. Proc. SRF2021. Conf. East Lansing, MI, USA. 2021. International Conference on RF Superconductivity. 2022. Geneva: JACoW. V. 20. P. 609–611. <https://doi.org/10.18429/JACoW-SRF2021-WEPCAV010>
16. *Sukhotski A. et al.* Characterization of Properties of 325-MHz Half-Wave Superconducting Resonators at Low Microwave Field Amplitudes // Phys. Part. Nucl. Lett. 2024. V. 21 (6). P. 1170–1173. <https://doi.org/10.1134/S1547477124701735>
17. *Sukhotski A. et al.* Electromagnetic Properties of Superconductive Low- β 325 MHz Half-Wave Resonators at Low RF Field // Supercond. Sci. Technol. 2025. V. 38. P. 015003. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ad9418>
18. *Мацневский С.В.* LinacCalc [Текст] // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. Официальный бюллетень. 2018. Москва: ФИПС. № 2018664631.
19. *Мацневский С.В., Лалаян М.В., Гусарова М.А.* Программа расчета мощности генератора для сверхпроводящих ускоряющих резонаторов [Текст] // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. Официальный бюллетень. 2024. Москва: ФИПС. № 2024686051.
20. *Padamsee H., Knobloch J., Hays T.* RF Superconductivity for Accelerators. 2nd Edition. 2008. Weinheim: Wiley-VCH.
21. *Немченко Р.Е., Гусарова М.А.* // Ядерн. физ. инжинир. 2020. Т. 11 (3). С. 171–173 [*Nemchenko R.E., Gusarova M.A.* // Phys. At. Nucl. 2020. V. 83. P. 1482. <https://doi.org/10.1134/s1063778820100178>. <https://doi.org/10.1134/S207956292001008X>
22. *Bakhareva T.A. et al.* Input Power Coupler for NICA Injector Coaxial Quarter Wave SC Cavity. Proc. SRF2017. Conf. Lanzhou, China. 2017. International Conference on RF Superconductivity. 2018. Geneva: JACoW. V. 18. P. 61–63. <https://doi.org/10.18429/JACoW-SRF2017-MOPB008>
23. *Matsievski S.V. et al.* Input Power Coupler for NICA Injector Coaxial Half Wave SC Cavity. Proc. RUPAC2018. Conf. Protvino, Russia. 2018. Russian Particle Accelerator Conference. 2018. Geneva: JACoW. V. 26. P. 375–377. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-WEPSB48>
24. *Лозеева Т.А., Мацневский С.В., Лалаян М.В., Гусарова М.А.* // Ядерн. физ. инжинир. 2018. Т. 9 (2). С. 188–191 [*Lozeeva T.A., Matsievskiy S.V., Lalayan M.V., Gusarova M.A.* // Phys. At. Nucl. 2018. V. 81. P. 1643. <https://doi.org/10.1134/s1063778818110133>. <https://doi.org/10.1134/S2079562917060173>
25. *Matsievski S.V. et al.* Adjustable Power Coupler for NICA HWR Cavities. Proc. SRF2019. Conf. Dresden, Germany. 2019. International Conference on RF Superconductivity. 2019. Geneva: JACoW. V. 19. P. 260–262. <https://doi.org/10.18429/JACoW-SRF2019-MOP078>

Program for Calculation of Generator Power for Superconducting Accelerating Resonators

S. V. Matsievsky¹, M. V. Lalayan¹, M. A. Gusarova¹ *, and I. R. Kalieva¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: MAGusarova@mephi.ru

Received May 5, 2025; revised May 15, 2025, accepted May 30, 2025

Abstract—A program for calculating the generator power for superconducting accelerating resonators has been developed taking into account the power loss in the resonator walls, the load of the charged particle beam current and additional RF power consumption caused by frequency shifts due to helium pressure fluctuations, the microphone effect and the Lorentz effect. The program is part of a set of tools for modeling high-frequency accelerating structures of linear accelerators of charged particles, and is a module of the LinacCalc software product.

Keywords: SRF, superconducting radio frequency