

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗБРОСА ПУЧКА В ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ: ФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Веремьева Е. О., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Савилова Ю. И. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В работе рассматривается влияние фазового разброса частиц на энергетический разброс пучка в линейном ускорителе. На основе модели ускорения в ВЧ-резонаторе выполнены расчёты для двух случаев фазовых отклонений, показавшие нелинейный рост энергетического разброса при увеличении длины сгустка. Отмечена высокая чувствительность качества пучка к фазовым нарушениям. Обсуждены современные методы оптимизации ускорителей, включая обучение с подкреплением и физически обусловленные алгоритмы машинного обучения, позволяющие учитывать физические ограничения и повышать эффективность настройки ускорительных систем.

Ускорители заряженных частиц являются ключевым инструментом современной физики и применяются как в фундаментальных исследованиях, так и в прикладных задачах. Одним из важнейших параметров качества пучка является энергетический разброс — отклонение энергии отдельных частиц от среднего значения. Его уменьшение повышает точность экспериментов и эффективность работы ускорительных установок [1-4].

Основной причиной возникновения энергетического разброса является различие фаз, с которыми частицы входят в высокочастотный (ВЧ) резонатор. Как отмечено в работе: «передние и задние частицы попадают в разные фазы переменного электрического поля и получают разный прирост энергии». Это приводит к неодинаковому ускорению и формированию распределения энергий в пучке.

Прирост энергии частицы в ВЧ-резонаторе определяется выражением:

$$\Delta E = e \cdot U \cdot \cos(\varphi), \quad (1)$$

где: e — заряд частицы (для электрона $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл, в относительных расчетах позволим себе принять $e = 1$); U — амплитуда напряжения на резонаторе (измеряется в мегавольтах, МВ); φ — фаза частицы, то есть момент времени (в угловых градусах), когда частица влетает в резонатор.

Если в пучке есть N частиц с разными фазами, мы можем рассчитать энергию каждой по формуле (1), а затем найти среднюю энергию и среднеквадратичный разброс [5,6].

Средняя энергия:

$$E_{\text{ср}} = (E_1 + E_2 + \dots + E_N) / N \quad (2)$$

Среднеквадратичный разброс:

$$\sigma_E = \sqrt{[(E_1 - E_{\text{ср}})^2 + (E_2 - E_{\text{ср}})^2 + \dots + (E_N - E_{\text{ср}})^2] / N} \quad (3)$$

Чем меньше σ_E , тем выше качество СЕБАФ.

В расчетной части рассматривались два случая: малый разброс фаз (20°) и большой (40°). При напряжении $U = 10$ МВ и пяти моделируемых частицах получены следующие результаты (таблица 1).

Таблица 1 – Энергетический разброс при различных фазовых отклонениях

Разброс фаз	Средняя энергия, МэВ	Энергетический разброс, кэВ
20°	9.92	62
40°	9.70	251

Увеличение фазового разброса в 2 раза приводит к росту энергетического разброса более чем в 4 раза. Это демонстрирует высокую чувствительность качества пучка к фазовым отклонениям и объясняет необходимость точной синхронизации и минимизации длины сгустка.

Современные ускорители содержат десятки и сотни регулируемых параметров, что делает ручную оптимизацию крайне сложной задачей [7,8]. В последние годы активно развиваются методы машинного обучения (ML), включая обучение с подкреплением (RL). RL-агент исследует пространство параметров ускорителя и формирует оптимальную стратегию настройки, максимизируя целевую функцию качества пучка.

Перспективным направлением является физически- обусловленное машинное обучение (PIML), в котором в алгоритм заранее включаются физические ограничения. Например, в функцию награды может входить ограничение на тепловыделение в резонаторах:

$$P_{heat} = \sum (U_i^2 / (R_i \cdot Q_i)), \quad (4)$$

где R_i – шунтовое сопротивление, Q_i – добротность i -го резонатора.

На сайте CERN (Европейская организация по ядерным исследованиям) есть возможность найти статью, где данная формула представлена в таком виде:

$$P_{diss} = V_{acc}^2 / (R/Q \cdot Q_0), \quad (5)$$

где: V_{acc} – ускоряющее напряжение (аналог U_i); R/Q – геометрический фактор резонатора; Q_0 – собственная добротность.

Такой подход позволяет получать физически корректные решения даже при отсутствии экспериментальных данных для обучения.

Проведённый анализ показывает, что энергетический разброс пучка существенно зависит от фазового распределения частиц (рисунок 1).

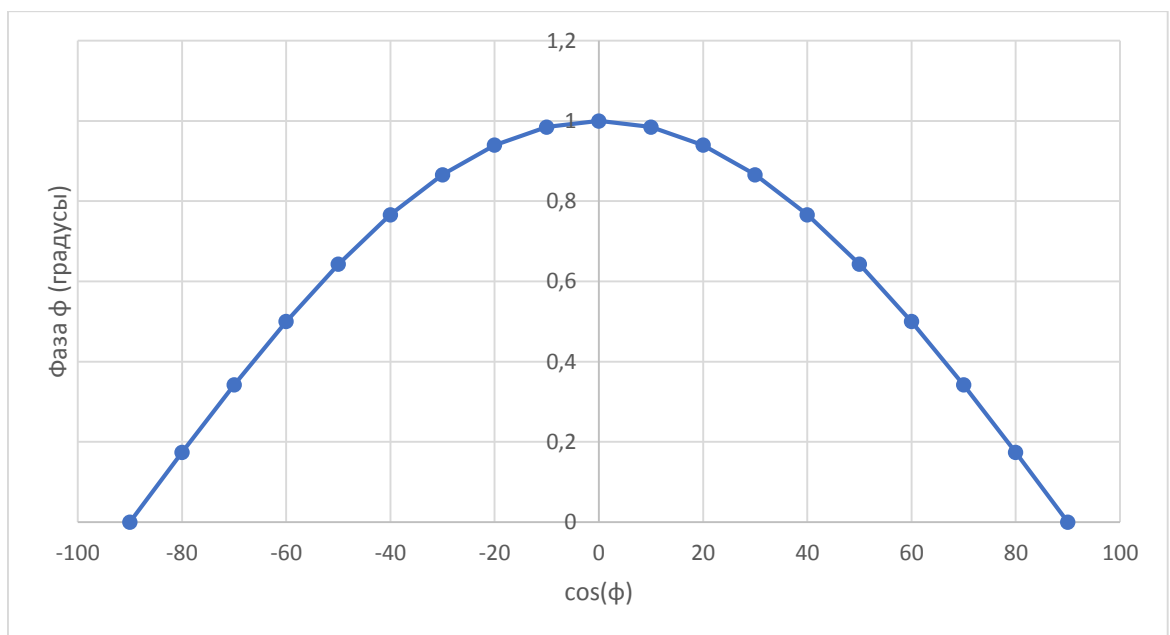


Рисунок 1 – Зависимость ускоряющего фактора $\cos(\phi)$ от фазы частицы

Увеличение разброса фаз приводит к нелинейному росту энергии пучка, что требует высокой точности синхронизации ускоряющих структур. Современные методы ML, включая RL и PIML, позволяют эффективно решать задачу многопараметрической оптимизации и повышать качество пучка в линейных ускорителях.

Список использованных источников:

1. Ауслендер, В. Л. Физика ускорителей : учеб. пособие / В. Л. Ауслендер. – Новосибирск : НГУ, 2017. – 320 с.
2. Лебедев, А. Н. Физика и техника ускорителей : учебник / А. Н. Лебедев. – М. : МИФИ, 2015. – 450 с.
3. Padamsee, H. RF Superconductivity: Science, Technology and Applications / H. Padamsee. – Weinheim : Wiley - VCH, 2009. – 528 p.
4. Wiedemann, H. Particle Accelerator Physics / H. Wiedemann. – 4th ed. – Cham : Springer, 2015. – 1021 p.
5. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие / В. Е. Гмурман. – 12 - е изд. – М. : Юрайт, 2020. – 478 с.
6. Среднеквадратическое отклонение // Википедия — свободная энциклопедия. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Среднеквадратическое_отклонение (дата доступа: 10.02.2026).
7. Maslennikov, S. RF heating efficiency of the terahertz superconducting hot - electron bolometer / S. Maslennikov // arXiv preprint, 2014. – No. 1404.5276. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1404.5276> (дата доступа: 15.02.2026).
8. CEBAF // Jefferson Lab Official Website. – Режим доступа: <https://www.jlab.org/cebaf> (дата доступа: 15.02.2026).
9. AI Helps Scientists Investigate the Universe's Biggest and Smallest Phenomena // U.S. Department of Energy Office of Science, 2025. – Режим доступа: <https://www.energy.gov/science/articles/ai-helps-scientists-investigate-universes-biggest-and-smallest-phenomena> (дата доступа: 15.02.2026).