**Численное и аналитическое исследование возможностей улучшения характеристик спонтанного и вынужденного излучения ондуляторов и лазеров на свободных электронах с гармониками ондуляторного поля**

**Федоров И.А.**

*аспирант*

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,физический факультет, Москва, РоссияE–mail: fedorov.ia15@physics.msu.ru

Ондуляторы и лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) не являются самостоятельными приборами. Они располагаются в цепочке ускорительного комплекса. Пучок частиц, приобретая энергию в ускорителе, проходит через эти приборы. Внутри приборов создано периодическое электромагнитное поле, которое влияет на пучок частиц: частицы генерируют тормозное излучение. Конфигурация электромагнитного поля позволяет значительно влиять на характеристики производимого излучения. ЛСЭ и ондулятор являются достаточно сложными и дорогостоящими приборами. За счет конфигурации поля внутри приборов возможно влиять на излучение, например максимизировать одну из гармоник. Эти конфигурации, в том числе, позволяют получить необходимое излучение при меньшей стоимости прибора. Так как полученное излучение обладает рядом уникальных свойств, у него большое количество потребителей из разных областей науки: физики, биологии, медицины, археологии и т.д. Исследование возможностей получения различного спектра излучения пользуется спросом в среде ученых.

Теоретическое описание эффектов начинается с тормозного излучения заряженной частицы под действием электромагнитного поля. Развитие теории позволило получить интеграл излучения (1), например, как получил Джексон [1] (формула 14.67):

 (1)

Основной проблемой для теоретиков на этом этапе является удобное вычисление этого интеграла. При помощи обобщенных функций Бесселя [2] научной группой Жуковского К.В. получена практика, позволяющая удобно вычислять этот интеграл для различных конфигураций поля прибора (ондулятор или ЛСЭ) [3]. Стоит отметить, что подход позволяет верифицировать полученный результат по виду выражения в зависимости от поля прибора. Помимо аналитического решения задачи в практике давно применяется численный подход. Используются программы численного счета, такие как: SPECTRA, GENESIS, Perseo и др. Для дополнительного анализа и верификации результата эти программы очень хорошо подходят.

В нашем исследовании мы рассматриваем реальные экспериментальные установки с излучением от видимого: SPARC, LEUTL и др., до рентгеновского: LCLS и SwissFEL и др., диапазона. Мы используем различные модификации поля внутри ЛСЭ для оценки влияния производимого излучения. Результаты последних исследований достаточно успешны, например:

● Четные гармоники спонтанного ондуляторного излучения (ОИ) возникают главным образом за счет отклонения и расходимости пучка электронов. Бетатронные колебания приносят некоторую поправку в мощность четных гармоник ОИ, но в современных установках они практически незначительны. Из наших аналитических формул мы получили правильные мощности излучения для всех гармоник ЛСЭ, подтвержденные экспериментальными данными, если учитывать в теоретическом расчете не только эмиттанс и сечение, но и эффективный угол электрон-фотонного взаимодействия на длине усиления ЛСЭ θ ≈ σγ/Lgain. Обычно это самый большой угловой вклад, и поэтому им нельзя пренебрегать.

● Для LCLS-II мы показываем, что эффективная мощность второй гармоники ЛСЭ из-за группировки на ее длине волны, индуцированной основной гармоникой ЛСЭ, на два порядка превышает мощность излучения самой второй гармоники.

● Для анализа генерации второй гармоники в веществе важно подавить вторую гармонику самого источника излучения.

Сейчас ведутся работы по изучению влияние второй гармоники поля ондулятора на генерацию гармоник ЛСЭ, которые предполагают существенно нетривиальный результат.

Работа выполнена при поддержке гранта фонда развития теоретической физики и математики «Базис» № 22-2-2-45-1.

**Литература**

1. Д*жексон, Дж. Классическая электродинамика // Изд-во: М.: Мир, 1965*
2. *P. Kuklinski; D. A. Hague, “Identities and Properties of Multi-Dimensional Generalized Bessel Functions,” arXiv, 2021. arXiv: 1908.11683* [*https://arxiv.org/abs/1908.11683*](https://arxiv.org/abs/1908.11683)
3. *Zhukovsky, K., Fedorov, I., and Gubina, N. Theoretical analysis of the influence of electron beam parameters on the harmonic powers in free electron lasers. Optics and Laser Technology 159 (2023), 108972–108972.* [*https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108972*](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108972)