

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА ПОТЕРЬ ПУЧКА ДЛЯ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ВЭПП-5

Ю. И. Мальцева¹, К. В. Астрелина

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Рассматривается принцип работы распределенного датчика потерь пучка на основе черенковского излучения в оптоволокне, установленного на электрон-позитронном инжекционном комплексе в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН. Выполнена оптимизация работы датчика на основе численного моделирования и полученных экспериментальных данных. При использовании кварцевого оптоволокна длиной 45 м, диаметром сердцевины 550 мкм и ФЭУ с микроканальными пластинами достигнуто пространственное разрешение не хуже 1 м. Создано программное обеспечение для обработки сигналов с датчика, которое позволит в режиме реального времени отслеживать распределение потерь вдоль всего ускорителя.

This paper describes a distributed beam loss monitor based on the Cherenkov effect in an optical fiber. This monitor is used at the BINP e^-e^+ Injection Complex. Optimization of monitor parameters based on numerical model and experimental data was carried out. By selecting 45 m long quartz fiber (with a large core diameter of 550 μm) and micro-channel plate PMT, we have achieved monitor spatial resolution of less than 1 m. Software for monitor signal processing was developed. It allows monitoring of real-time beam loss distribution along the beamline.

PACS: 29.20.db; 29.27.Ac; 29.27.Fh

ВВЕДЕНИЕ

Диагностика потерь пучка важна на всех этапах работы ускорителя заряженных частиц, начиная от его наладки и запуска и заканчивая оптимизацией потерь в режиме реального времени в процессе штатной работы установки. Последние два десятилетия альтернативой локальным датчикам является распределенный датчик потерь пучка на основе излучения Вавилова–Черенкова в оптоволокне. Наряду с многими ускорительными центрами [1, 2] данная методика использования оптических волокон в качестве системы диагностики потерь пучка разработана в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН) на электрон-позитронном инжекционном комплексе [3]. Этот датчик может быть использован как в однопролетных каналах транспортировки пучка, так и в накопительном кольце.

В данном сообщении описываются требования к датчику потерь пучка на инжекционном комплексе в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН. Приводятся результаты работы датчика с оптимальными параметрами. Показано программное обеспечение, которое позволяет осуществлять настройку прохождения пучка в ускорителе в режиме реального времени.

¹E-mail: yuliya.maltseva@gmail.com

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ТРЕБОВАНИЯ К ДАТЧИКУ

Инжекционный комплекс, обеспечивающий два коллайдера ИЯФ СО РАН высокоэнергетическими пучками электронов и позитронов, состоит из двух последовательных линейных ускорителей на энергию 300 и 500 МэВ, накопителя-охладителя и каналов выпуска с последующей транспортировкой пучков до потребителей. В сезоне 2018/2019 комплекс работал на энергию 400 МэВ с частотой инжекции электронов — 2 Гц, позитронов — 5 Гц. Частота выпуска из накопителя достигала 1 Гц. В накопителе с периметром 27,4 м ток пучка составляет 20–40 мА, а длительность пучка — менее 1 нс. Типичная величина потерь пучка в процессе транспортировки достигает 50 %, поэтому необходима штатная система диагностики потерь пучка.

Основные требования, которые предъявляются к оптоволоконному датчику потерь пучка на инжекционном комплексе, следующие: а) высокое пространственное разрешение не хуже 1 м, которое определяется исходя из расстояния между магнитными элементами ускорителя; б) радиационная стойкость оптоволокна, позволяющая эксплуатацию датчика при дозах до 10^3 Гр; в) оптимальная стоимость компонентов.

В результате тестирования различных типов оптоволокон, ФЭУ и АЦП был сделан выбор датчика с оптимальными параметрами. Среди оптоволокон оптимальным вариантом с точки зрения пространственного разрешения, радиационной стойкости и стоимости является кварцевое оптоволокно со ступенчатым профилем показателя преломления (СППП) и диаметром сердцевины 550 мкм. При этом длина отрезка оптоволокна составляет примерно 45 м. Для достижения наилучшего пространственного разрешения датчика световой сигнал необходимо регистрировать с торца, противоположного направлению движения пучка. В качестве фотодетектора необходимо использовать ФЭУ на микроканальных пластинах (МКП), который обладает минимальными временными характеристиками и высоким коэффициентом усиления. АЦП следует подбирать с полосой пропускания не менее 200 МГц и частотой дискретизации не хуже $500 M_{\text{выб}}/\text{с}$.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для диагностики распределения потерь электронного пучка оптоволоконный датчик потерь был установлен в канале выпуска из накопителя-охладителя. Было выбрано кварцевое многомодовое оптоволокно с СППП марки «Thorlabs» (FG550UEC) с параметрами: диаметр сердцевины/оболочки — 550/600 мкм, $NA = 0,22$, максимальный коэффициент затухания — 0,01 дБ/м. Расчетное значение дисперсии составляет 0,19 нс/м. ФЭУ на МКП был выбран производства АО «Катод» (Новосибирск) со спектральным диапазоном чувствительности фотокатода в максимуме спектра черенковского излучения (300–900 нм), временем нарастания фронта 0,5 нс и длительностью импульса анодного тока (полуширина) — не менее 1,5 нс.

На рис. 1 представлены распределения потерь электронного пучка в канале выпуска из накопителя, полученные с двух торцов оптоволокна. Регистрация сигнала, распространяющегося в направлении, противоположном направлению движения пучка, позволяет получить информацию о трех существенных потерях пучка. В то время как сигнал с противоположного торца дает информацию об одной потере, пике Г, которая является комбинацией потерь Б и В вследствие межсимвольной интерференции.

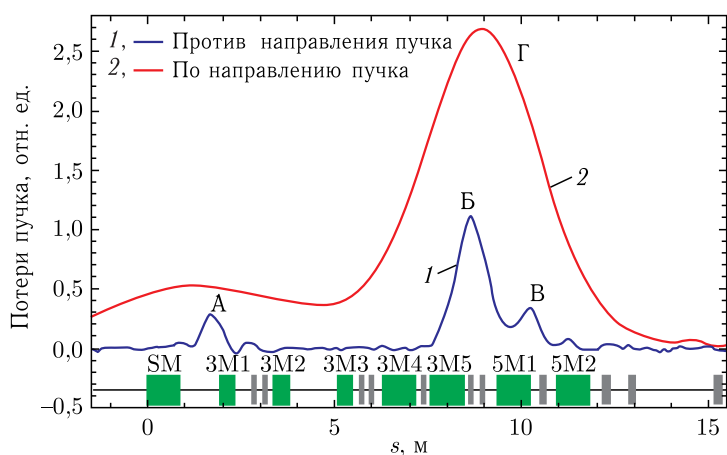


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Потери пучка электронов в канале выпуска из накопительного кольца, полученные с двух торцов оптоволоконна: синяя кривая (1) — с торца, расположенного против направления движения пучка, красная кривая (2) — по направлению

Пик А — типичная потеря во время выпуска пучка в области септум-магнита SM. Полуширина пика Г составляет 3,8 м при длине оптоволоконна 31 м, а пика Б — 0,9 м при длине оптоволоконна 19 м. Таким образом, регистрация сигнала, распространяющегося в направлении, противоположном направлению движения пучка, дает в 4 раза лучшее пространственное разрешение оптоволоконного датчика потерь пучка, по сравнению с регистрацией сигнала, распространяющегося по направлению движения пучка. С учетом разницы коэффициентов усиления ФЭУ интенсивность сигнала при этом будет на порядок меньше. Оба этих вывода хорошо согласуются с результатами аналитических расчетов и численного моделирования.

3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Создано программное обеспечение для обработки сигналов датчика, которое позволяет в режиме реального времени налаживать режим работы ускорителя, отслеживать распределение потерь пучка вдоль структуры ускорителя. Для определения места потери пучка вдоль структуры ускорителя программа пересчитывает время прихода сигнала с АЦП в продольную координату. Поскольку было решено регистрировать световой сигнал с торца, противоположного направлению движения пучка, то коэффициент пересчета времени в координату равен примерно $c/(n + 1)$, где n — показатель преломления сердцевины оптоволоконна. Для более точного распределения потерь из полученного сигнала вычитается шум, записанный в отсутствие пучка, и применяется интерполяция квадратичным сплайном. Для более наглядного отслеживания потерь существует функция сохранения сигнала с предыдущими параметрами магнитной системы и наложение его на текущие измеряемые данные.

На рис. 2 показано окно программы, которое накладывает результат на структуру, позволяет сохранять и накладывать предыдущий результат и управлять напряжением,

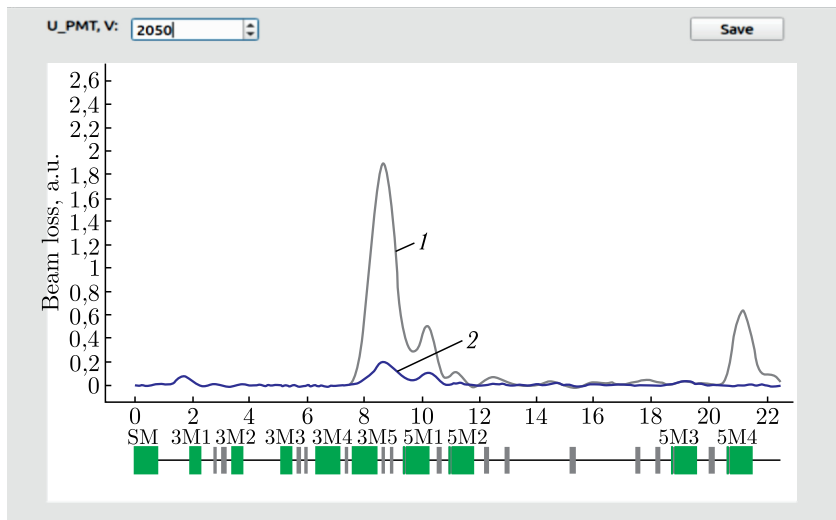


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Отображение результатов анализа: распределение потерь пучка в процессе наладки электронного выпускного канала, вызванных магнитной коррекцией диполей (серая кривая, 1), достигнутая оптимальная настройка канала (синяя кривая, 2)

подаваемым на ФЭУ. В поле отображения данных показаны типичные распределения потерь пучка в процессе наладки выпуска электронов. Во всех случаях присутствует потеря пучка в месте его выпуска из накопителя (после септум-магнита SM), напряжение, поданное на ФЭУ, было неизменным. Распределение, показанное серой кривой (1), вызвано «кручением» магнитной коррекции диполей 3M5 и 5M4. Распределение, показанное синей кривой (2), демонстрирует потери в результате оптимизированной транспортировки пучка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты работы оптоволоконного датчика потерь пучка с выбранными оптимальными параметрами на электрон-позитронном инжекционном комплексе в ИЯФ СО РАН. При использовании отрезка кварцевого оптоволоконна длиной 45 м, диаметром 550 мкм и ФЭУ на МКП достигнуто пространственное разрешение датчика не хуже 1 м. Создано программное обеспечение для обработки сигналов датчика, которое позволяет в режиме реального времени налаживать режим работы ускорителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nebot del Busto E. et al.* // Proc. of the 4th Intern. Beam Instrumentation Conf. "IBIC 2015", Melbourne, Australia, Sept. 13–17, 2015. P. 580
2. *Marechal X.-M., Asano Y., Itoga T.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2012. V. 673. P. 32–45.
3. *Maltseva Yu. et al.* // Proc. of XXVI Russ. Particle Accelerator Conf. "RuPAC2018", Protvino, Russia, Oct. 1–5, 2018. P. 39.