

**СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВНЕШНЕЙ
ПОВЕРХНОСТИ ТРАКТА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА УСКОРИТЕЛЯ ЛИУ-30
СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫМИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДЕТЕКТОРАМИ**

**REGISTRATION SYSTEM OF BREMSSTRAHLUNG
ON THE OUTER SURFACE OF THE LIU-30 ACCELERATOR BEAM TRANSPORT
TRACK BY SCINTILLATION FIBER-OPTIC DETECTORS**

А. В. Родигин, В. П. Грицына, О. В. Зверев, Б. И. Модель, В. Н. Матвей, А. В. Тухий
A. V. Rodigin, V. P. Gritsyna, O. V. Zverev, B. I. Model, V. N. Matvey, A. V. Tikhii

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

Для диагностики качества транспортировки пучка ускорителя ЛИУ-30 разработан макет многоканальной системы регистрации тормозного излучения с помощью сцинтилляторов с наносекундным быстродействием, размещенных на внешней поверхности тракта транспортировки. Свет от сцинтилляторов передается по оптическим кабелям на фотоприемники, подключенные к входам регистраторов. Сигналы сцинтилляционных детекторов привязаны по времени к сигналам индукционных датчиков тока, установленных в обратном токопроводе вдоль тракта. Для уменьшения доли «черенковского» света в световых сигналах детекторов используются узкополосные оптические фильтры. Остаточный «черенковский» сигнал выделяется с помощью дополнительных оптических кабельных каналов без сцинтилляторов и вычитается из сигналов детекторов.

To diagnose the quality of e-beam conduction of the LIU-30 accelerator, a model of a multichannel bremsstrahlung registration system was developed with the help of scintillators with nanosecond response located on the outer surface of the e-beam transportation track. Light from scintillators is transmitted via optical cables to photodetectors connected to the inputs of recorders. The scintillation detector signals are time-related to the signals of the inductive current sensors installed in the return current path along the track. To reduce the share of "Cherenkov" light in the detector's light signals, narrow-band optical filters are used. The residual Cherenkov signal is extracted with the aid of additional optical cable channels without scintillators and is subtracted from the signals of the detectors.

Введение

При транспортировке электронных пучков в режиме поперечного удержания частиц однородным продольным магнитным полем имеют место потери электронов вследствие развития неустойчивостей на параметрических резонансах, обусловленных аксиальными неоднородностями собственных и внешних электрических и магнитных полей, а также воздействие на пучок поперечных магнитных полей несимметричных токов, протекающих по элементам конструкции линейного индукционного ускорителя. Параметрическая неустойчивость приводит к росту толщины трубчатого электронного слоя, а также уходу резонансных частиц на стенки ускорительного тракта

[1]. Поперечные колебания нарушают динамику распространения пучка, искажают форму импульса тока пучка, приводят к его радиальному расширению с потерей части электронов на стенках тракта [2]. Для контроля качества проводки сильного релятивистского электронного пучка (СРЭП) используются средства диагностики, основанные на регистрации тока пучка и тормозного излучения (ТИ) от электронов из СРЭП, рассеянных на внешних стенках тракта.

В статье [3] описаны средства диагностики качества транспортировки СРЭП ускорителя HERMES-III по тракту длиной 10,8 м, включающие регистрацию амплитуды и формы импульсов тока пучка с помощью шунтов в разрывах тракта, а также регистрацию интегральных значений дозы

тормозного излучения (ТИ) от рассеянных на стенках тракта электронов с помощью набора точечных термолюминесцентных дозиметров (ТЛД), распределенных вдоль тракта с внешней его стороны. Анализ информации с датчиков тока и дозиметров позволяет локализовать области потерь электронов и оценить уровень потерь на стенках тракта.

Аналогично, на ускорителе ЛИУ-30 для диагностики качества транспортировки СРЭП использовался анализ результатов с индукционных датчиков тока (ИДТ) и с ТЛД (по методу дозиметрии ИКС).

Однако с помощью ТЛД невозможно зафиксировать время появления и форму импульса ТИ, что важно для конкретизации основных причин нарушений качества проводки (нарушений равновесного состояния) СРЭП и более точной локализации нарушений. Кроме того, для получения дозиметрических данных с помощью ТЛД необходимо время на обработку данных и действия по обслуживанию условий повышенным наведенным излучением.

Авторами данного доклада было предложено дополнить упомянутые средства диагностики датчиками ТИ с наносекундным разрешением сравнимыми по размерам с датчиками ИКС. В нужной позиции вне вакуумного тракта устанавливаются комптоновские датчики рядом с датчиками ИКС. Для реализации данного технического решения на ЛИУ-30 выбраны сцинтилляционные волоконно-оптические детекторы (СВОД), обладающие повышенной устойчивостью к электромагнитным помехам [4]. Измерительные каналы датчиков синхронизируются по времени с соответствующими измерительными каналами ИДТ.

Набор сцинтилляторов с наносекундным разрешением располагается рядом с ТЛД, регистрируются амплитуды и формы импульсов на выходе СВОД. Производится калибровка СВОД по инте-

гральной дозе при помощи ТЛД, сравниваются амплитуды и формы импульсов со сцинтилляционных детекторов и с датчиков тока, после чего делаются выводы об изменении уровней электронных потерь СРЭП на стенках тракта в течение импульса тока в процессе прохождения СРЭП по ускорительному тракту [5]. Отметим, что в период между калибровками использование ТЛД в экспериментах не является необходимым.

Канал регистрации на основе СВОД

Структурная схема одного канала регистрации на основе СВОД приведена на рис. 1.

Пластмассовый оптический кабель из состава СВОД, проложенный около стенок тракта ускорителя, может испытывать воздействие световой «черенковской» наводки от ТИ, поэтому в СВОД применена схема компенсации наводки. Световой сигнал от сцинтиллятора поступает на торец первой жилы двойного оптического кабеля. Торец второй жилы двойного кабеля остается свободным, и эта жила используется для измерения паразитной «черенковской» составляющей в оптическом кабеле («жила-свидетель»). Оптические сигналы с обеих жил поступают на узкополосный светофильтр, пропускающий пик спектра сцинтилляторов, где широкополосная «черенковская» составляющая сигнала существенно подавляется. Отфильтрованные сигналы подаются далее на входы фотоприемного устройства (ФП). В ФП эти сигналы преобразуются в сигналы напряжения, а «черенковские» составляющие вычитаются из «грязных» сигналов (сцинтилляционных сигналов с примесью «черенковских» составляющих). Результат вычитания («чистый сигнал») регистрируется. Сигнал напряжения с ФП, соответствующий «грязному» сигналу, как правило, больший по амплитуде, также может регистрироваться с целью контроля отсутствия «зашкаливания» канала.

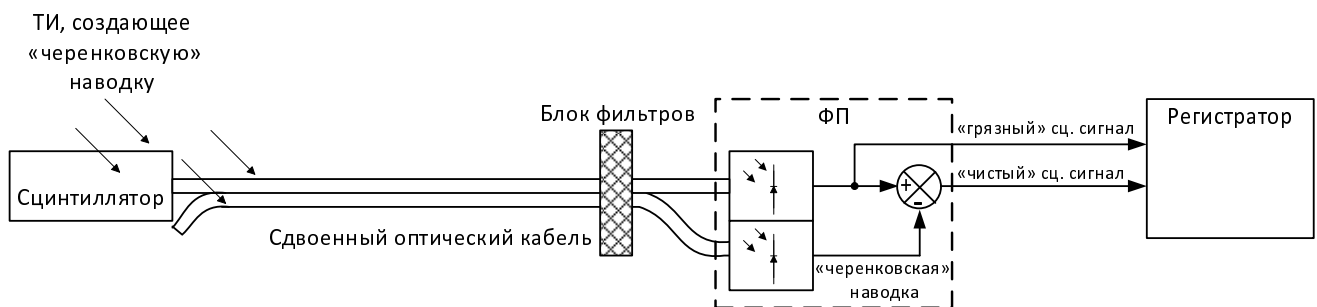


Рис. 1. Структурная схема канала регистрации на основе СВОД

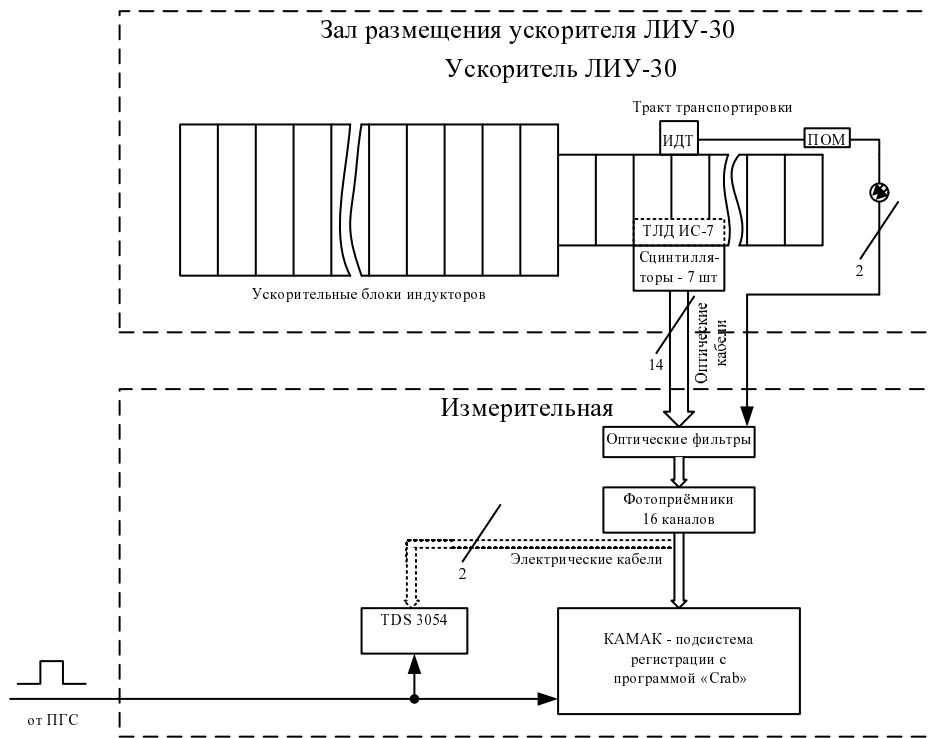


Рис. 2. Схема измерений ТИ на внешней поверхности тракта транспортировки СРЭП ЛИУ-30 с временной привязкой к ИДТ с применением системы СВОД

Макет системы СВОД

Разработан макет многоканальной системы измерения ТИ на основе СВОД (система СВОД) предназначенный для осуществления динамического дозового контроля ТИ по азимуту поперечных сечений тракта транспортировки СРЭП ЛИУ-30. В системе реализована привязка по времени к токовым сигналам ИДТ.

Схема измерений представлена на рис. 2.

Семь сцинтилляционных датчиков с наносекундным быстродействием на основе полистирола (2 % паратерфенила и 0,06 % РОРОР) с размерами $36 \times 13 \times 13$ мм размещались в сечении секции транспортировочного тракта в зависимости от целей опыта двумя способами:

- для калибровки – как можно ближе друг к другу в одной точке на внешней поверхности тракта транспортировки.

- для регистрации ТИ – по окружности сечения в направлении по азимуту 4,8 и 12 часов на внешней поверхности тракта.

Рядом со сцинтилляторами размещались датчики ИКС. Один из датчиков ИДТ, расположенный вблизи данного сечения, подключался к передающему оптическому модулю (ПОМ), выполненному на основе светодиодного трансмиттера

HFBR-1527, где электрический сигнал преобразовывался в световой и передавался по оптическому кабелю.

Импульсные световые сигналы от семи сцинтилляторов одного ПОМ передавались по восьми двоянным оптическим кабелям типа HFBR-EUD длиной по 50 м, проложенным из зала размещения установки ЛИУ-30 в измерительное помещение. Здесь 16 световых сигналов фильтровались в блоке оптических фильтров, содержащих 14 каналов на основе стандартного цветного стекла СС8, пропускающего пик спектра сцинтилляторов 420 нм, и два канала с узкополосным интерференционным фильтром на 650 нм, пропускающим пик спектра излучения светодиода ПОМ.

Далее световые сигналы поступали на четыре фотоприемные устройства, содержащие каждое по четыре канала преобразователей света в напряжение, выполненных на основе широкополосных аналоговых ресиверов HFBR-2526Z с PIN-фотодиодами на входах и встроенными трансимпедансными усилителями со схемами вычитания, где преобразовывались в 16 сигналов напряжения и регистрировались КАМАК-подсистемой с частотой дискретизации 200 МГц.

Для повышения помехоустойчивости системы СВОД питание ее устройств осуществлялось от

мотора-генератора, обеспечивающего гальваническую развязку от сети ~220 В.

Пуск регистраторов КАМАК-подсистемы осуществлялся от программируемого генератора сигналов (ПГС) установки ЛИУ-30 с индивидуально установленным временем задержки пуска.

Результаты испытаний макета СВОД

При помощи осциллографа TDS3054 с частотой дискретизации 5 ГГц получены типовые осциллограммы «грязного» и «чистого» сцинтилляционных сигналов с одного из каналов. Вычислена (в электронных таблицах) временная диаграмма разности этих сигналов, соответствующая «черенковскому» сигналу (рис. 3). Доля «черенковской» составляющей в канале регистрации составила ~38 % по амплитуде.

Сцинтилляционный сигнал запаздывает относительно сигнала «черенковской» составляющей на несколько наносекунд. Это можно объяснить тем, что «черенковское» излучение возникает непосредственно в оптическом кабеле, причем на достаточно протяженном (метры) участке его примыкания к стенке тракта. По этой причине возникший «черенковский» световой импульс доходит до фотоприемника раньше, чем свет от сцинтиллятора, состыкованного с дальним торцом кабеля. Выраженное запаздывание «чистого» сигнала свидетельствует о правильном вычитании «черенковской» составляющей.

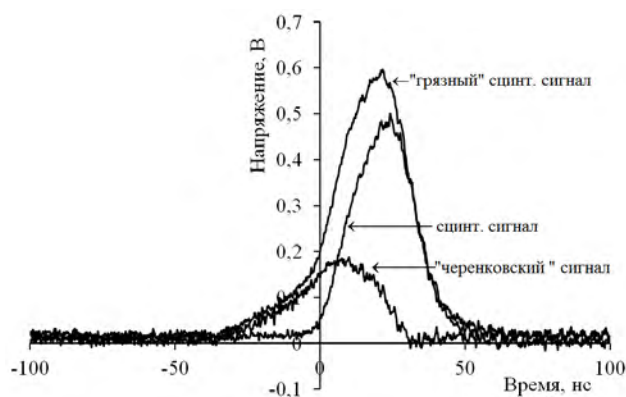


Рис. 3. Осциллограммы «грязного» и «чистого» сцинтилляционных сигналов и вычисленная временная диаграмма «черенковской» составляющей «грязного» сигнала

Аналогичные осциллограммы были получены с применением многоканальной КАМАК-подсистемы регистрации импульсов напряжения. Пример зарегистрированной осциллограммы по

одному из каналов приведен на рис. 4. Штриховой линией показан «грязный» сигнал, сплошной линией – «чистый» сцинтилляционный сигнал, пунктирной линией – вычисленная временная диаграмма «черенковской» составляющей. Осциллограмма сглажена по сравнению с осциллограммами (рис. 3) из-за более низкой частоты дискретизации (200 МГц).

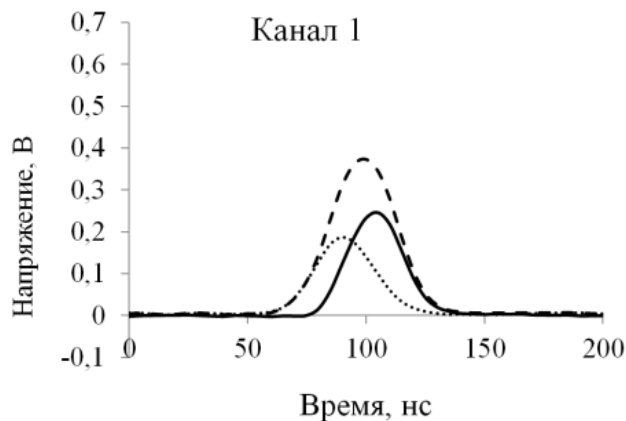


Рис. 4. Зарегистрированные системой СВОД осциллограммы «грязного» (штрих) и «чистого» сцинтилляционных сигналов, вычисленная диаграмма «черенковской» составляющей (пунктир)

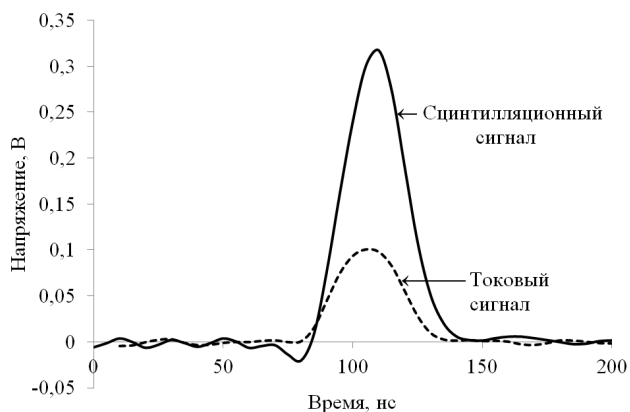


Рис. 5. Зарегистрированные системой СВОД осциллограммы сцинтилляционного сигнала и тока СРЭП с ИДТ

На рис. 5 представлены зарегистрированные при помощи СВОД: «чистый» сцинтилляционный сигнал (сплошная линия) и токовый сигнал с близлежащего ИДТ (пунктир). Токовый сигнал примерно совпадает по времени со сцинтилляционным сигналом. Здесь учтена хроматическая дисперсия при прохождении света по кабелю. Проведенный расчет показал, что из-за хроматической дисперсии красный свет от ПОМ задерживается в кабеле длиной 40 м на 8 нс меньше, чем

синий свет от сцинтиллятора (цвета – согласно длинам волн фильтров).

Экспериментальная зависимость пиковых показаний СВОД от дозовых значений по методике ИКС (с учетом погрешностей измерений) для одного из каналов приведена на рис. 6. Детекторы ИКС размещались в непосредственной близости от сцинтилляторов. Для уменьшения погрешности от неравномерности поля детекторы ИКС устанавливались с разных сторон вокруг сцинтилляторов-вплотную к ним. Показания детекторов ИКС усреднялись.

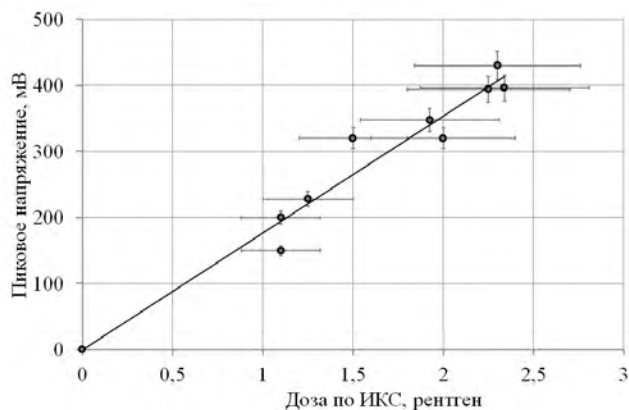


Рис. 6. Зависимость пикового значения отклика СВОД от дозы ТИ по ИКС

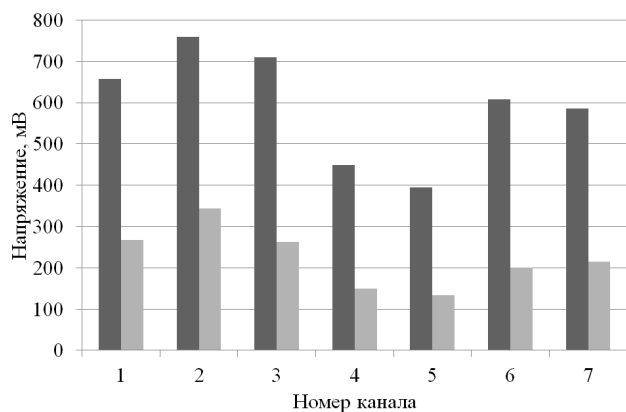


Рис. 7. Гистограммы сцинтилляционных откликов в двух калибровочных опытах

Измерялись пиковые значения сигналов СВОД, пропорциональные интегральным, так как длительность импульса в опытах была стабильна. Зависимость аппроксимирована прямой линией. Дозовая чувствительность канала СВОД по пиковому значению составила ~ 180 мВ/Р.

Проведена относительная калибровка сцинтилляционных детекторов при взаимно близком

размещении сцинтилляторов «связкой» с прилеганием их торцов к верхней поверхности транспортировочного тракта. В двух калибровочных включениях установки получены пиковые значения сцинтилляционных откликов по каналам СВОД и измерены соответствующие им интегральные дозы по ИКС. Разброс пиковых значений составил – 35 %, а для второго опыта – 50 %. относительно средних величин в этих опытах. На рис. 7 приведены гистограммы сцинтилляционных откликов в двух калибровочных опытах по каналам.

Испытана система СВОД с расстановкой сцинтилляционных детекторов по азимуту сечения транспортировочного тракта. Три детектора устанавливалось в сечении транспортировочного тракта через 120° – сверху, слева и справа при взгляде на пучок (на 12, 8 и 4 часов по азимуту). Используются калибровочные данные. В табл. 1, приведены дозовые значения по кругу сечения, определенные при помощи системы СВОД в двух опытах.

Таблица 1

Дозовые значения по кругу сечения транспортировочного тракта, полученные при помощи системы СВОД (взгляд на пучок)

Эксперимент №	Датчики	левый	правый	верхний
1,2	Каналы СВОД	1	2	3
1	Пик. значение, мВ	486	597	184
1	Доза, рентген	1,99	1,91	0,77
2 (совместный)	Пик. значение, мВ	528	703	209
2 (совместный)	Доза, рентген	2,17	2,25	0,88

По таблице видно, что верхним детектором зарегистрированы меньшие показания относительно левого и правого детекторов в обоих опытах. Это свидетельствует о неравномерном рассеянии электронов по азимуту и физически может быть связано, например, с изменением поперечного профиля пучка из-за его смещения или смещения его эффективного центра тяжести. Полученная информация является полезной при исследовании качества проводки ЭП.

В совместном эксперименте ускорителя и реактора дозы, зарегистрированные методом ИКС на стенках тракта транспортировки, более чем на порядок превышали типичные показания в контро-

лируемом сечении по причине облучения ИКС реактором. Однако, по данным, приведенным в табл. 1, видно, что система регистрации СВОД функционировала в штатном режиме и были зарегистрированы типичные значения сцинтилляционных сигналов.

Реакция системы СВОД на отключение определенного количества ускорительных модулей (более 50 %) показана на примерах, изображенных на рис. 8. Сцинтилляционные отклики изменялись по амплитуде и форме, что свидетельствовало о разных уровнях энергетических потерь СРЭП в экспериментах.

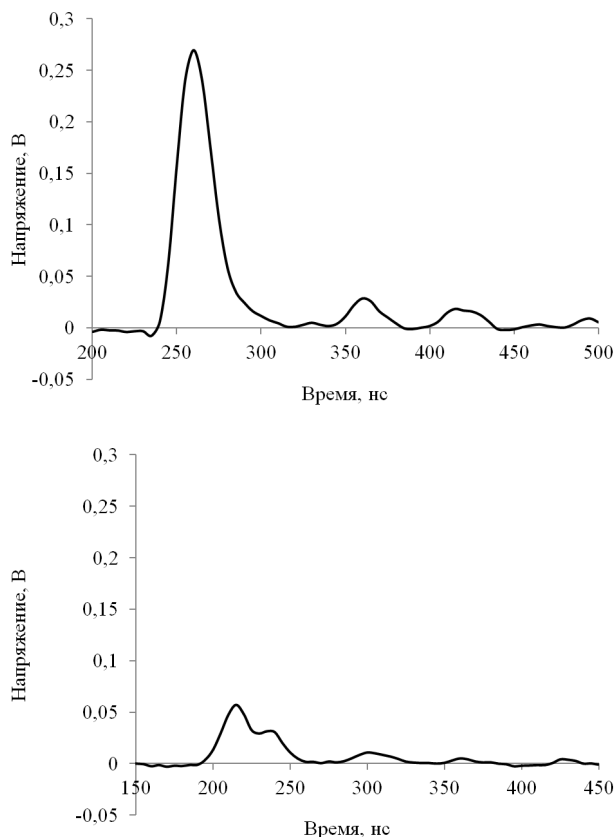


Рис. 8. Примеры сцинтилляционных откликов системы СВОД при отключении определенного количества ускорительных модулей

Замечания:

– в СВОД компенсируется «черенковская» наводка на оптический кабель. Однако «черенковское» излучение возникает также и в самих сцинтилляторах. Доля «черенковского» излучения в используемых пластмассовых сцинтилляторах сравнительно невелика (около 7 %) и на данном этапе работ не учитывалась. Тем не менее, учет этой доли может потребоваться при более точных

измерениях дозы. Регистрация сцинтилляционного излучения с учетом «черенковской» доли может быть осуществлена с применением способа, описанного в [6];

– в ходе экспериментов было замечено, что как правило, рост паразитного ТИ на поверхности тракта транспортировки, то есть увеличение энергетических потерь СРЭП, сопровождался снижением дозы ТИ на выходном окне ускорителя;

– динамический диапазон канала СВОД определяется возможностями АЦП подсистемы регистрации и ограничен значением отношения сигнал/шум около 100.

Итоги и выводы:

– система регистрации СВОД устойчиво функционировала в условиях электромагнитной и радиационной обстановки ускорителя ЛИУ-30;

– уровень электромагнитных помех находился на уровне собственных шумов АЦП;

– расстановка детекторов СВОД по кругу сечения транспортировочного тракта дала возможность получать информацию об изменении поперечного профиля пучка, связанного с его смещением или со смещением его эффективного центра тяжести, и наличия сопутствующих энергетических потерях пучка при его взаимодействии со стенками транспортировочного тракта;

– привязка по времени сигналов СВОД к сигналам ИДТ дает информацию о месте и времени появления импульса ТИ на внешней поверхности тракта;

– измерения системой СВОД способны заменить ТЛД-измерения ТИ на внешней поверхности транспортировочного тракта, но при условии проведения периодической калибровки при помощи ТЛД;

– возможность дистанционной и быстрой регистрации ТИ при помощи СВОД освобождает персонал установки от непосредственного обслуживания детекторов (доступ к которым иногда ограничен) и позволяет на базе СВОД построить оперативную обработку и графическое представление ТИ с помощью вспомогательных программ с использованием ПК;

– в отличие от детекторов метода ИКС система регистрации СВОД позволяет проводить регистрацию ТИ на внешней поверхности транспортировочного тракта в совместных экспериментах ЛИУ-30 и реактора;

– отмечена реакция СВОД на изменения ТИ в результате изменений уровней энергетических

потерь СРЭП при исключении из работы некоторых ускорительных модулей, что может быть использовано при оптимизации потерь СРЭП в зависимости от числа и порядка отключаемых модулей;

– в совокупности представленные результаты подтверждают расширение возможностей диагностики качества проводки СРЭП по регистрации его дозовых потерь.

Список литературы

1. Павловский А. И., Босамыкин В. С. Линейные индукционные ускорители на радиальных линиях // Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики. Сборник к 80-летию со дня рождения академика Ю. Б. Харитона. Л.: НАУКА, 1984. С. 144–147.

2. Генерация и фокусировка ультрарелятивистских электронных пучков / Под ред. Л. И. Рудакова. М.: Энергоатомиздат, 1990.

3. Sanford T. W. L. et.al. Transport dynamics of a 19MeV, 700kA electron beam in a 10.8m gas cell // Journal of Applied Physics, 1991. 70, 1778; doi: 10.1063/1.349493.

4. Родигин А. В., Эльяш С. Л., Пикарь В. А. Волоконно-оптический монитор-дозиметр импульсного ионизирующего излучения // ВАНТ. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2010. Вып. 4. С. 8–9.

5. Пат. № 2601772 (RU) G01T1/00 Способ диагностики импульсного ультрарелятивистского пучка электронов в тракте линейного индукционного ускорителя / В. П. Грицына, О. В. Зверев, Б. И. Модель, А. В. Родигин // Бюл. БИПМ, № 31. 2016.

6. Пат. № 2529447 (RU) G01T1/20 Способ регистрации характеристик ионизирующего излучения и устройство для его осуществления / А. В. Родигин, Т. В. Лойко, С. Л. Эльяш // Бюл. № 27, 2014.