

СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА УСКОРИТЕЛЕЙ ЛУ-7-2 И ЛУ-10-20

SYSTEM OF ON-LINE ENERGY CONTROL OF ELECTRON BEAM FOR ACCELERATORS LU-7-2 AND LU-10-20

*Н. Н. Курапов, Я. В. Бодряшкин, В. Н. Леонтьев, А. И. Малыгин, С. М. Придчин,
Н. П. Ситников, А. В. Тельнов, А. С. Черкасов, И. В. Шориков
N. N. Kurapov, Ya. V. Bodryashkin, V. N. Leont'ev, A. I. Malygin, S. M. Pridchin,
N. P. Sitnikov, A. V. Tel'nov, A. S. Cherkasov, I. V. Shorikov*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,

пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics
(RFNC-VNIEF)

Во время запуска, наладки или эксплуатации ускорителя возникает необходимость проводить измерение выходной энергии электронов в оперативном режиме. С этой целью разработана система, позволяющая осуществлять оперативный контроль энергетического спектра ускоренных электронов с одновременным измерением среднего тока. Эта система основывается на методе поглощающих фильтров, состоит из измерительной сборки и блока автоматизированного контроля энергии пучка и предназначена для измерения энергии ускоренных электронов в диапазоне от 1 до 10 МэВ при средних токах пучка от 20 до 150 мкА.

During start-up, adjustment or operation of the accelerator, the necessity arises for measuring the output electron energy in the on-line mode. For this purpose a system has been developed, allowing an on-line control of accelerated electron energy spectrum together with a simultaneous measurement of average current. This system is based upon an absorption filter method, consists of a measuring assembly and a unit of computer-aided beam energy testing. It is meant for measurement of accelerated electron energy in the range 1–10 MeV at average beam currents from 20 to 150 μ A.

Введение

С 1994 года в ИЯРФ функционирует линейный резонансный ускоритель электронов ЛУ-10-20, предназначенный для исследований радиационной стойкости приборов и материалов при наборе больших интегральных доз на электронном и тормозном излучениях [1]. Модернизация ускорителя ЛУ-10-20 включает в себя разработку и создание автоматизированной системы управления и контроля (АСУК). Основным свойством новой АСУК будет возможность с высокой точностью задавать и поддерживать рабочие параметры ускорителя, обеспечивая, тем самым, идентичность выходных параметров пучка после повторных включений. Одной из составных частей работ по созданию новой АСУК ЛУ-10-20 является разработка автоматизированной системы контроля выходной энергии пучка электронов.

Измерение выходной энергии электронов требуется не только в процессе запуска, наладки или снятия характеристик ускорителя, но и при проведении физических экспериментов, требующих изменения выходной энергии пучка. Одними из наиболее точных измерителей спектра являются магнитные спектрометры. Однако, их желательно интегрировать в выходную систему ускорителя еще на этапе его разработки, иначе такие преимущества, как разрешение и малое время измерения в значительной степени нивелируются. В любом случае, применение отклоняющих магнитов, является дорогостоящим и трудоемким решением. Чтобы обеспечить оперативность и универсальность (возможность использования на разных установках), было решено для измерения энергии пучка использовать метод поглощающих фильтров. Новая система измерения параметров пучка, состоящая из измерительной сборки и системы контроля, является переносной, компактной и с ее

помощью можно в минимальные сроки организовать оперативные измерения средней энергии ускоренного пучка электронов.

1. Метод измерения выходной энергии пучка с помощью поглощающих фильтров

Задача измерения выходной энергии пучка наиболее просто решается методом поглощения электронов в веществе. Для алюминия зависимость энергии от длины пробега имеет вид [2]:

$$R = 0,412 \cdot W_k^n, \quad \text{для } 0,01 \leq W_k \leq 3 \text{ МэВ} \quad (1)$$

$$R = 0,53 \cdot W_k - 0,106, \quad \text{для } 3 \leq W_k \leq 10 \text{ МэВ}$$

где R – пробег электронов в алюминии, г/см²;
 W_k – кинетическая энергия, МэВ;
 $n = 1,265 - 0,0954 \cdot \ln W_k$.

Непосредственно измерить полный пробег затруднительно, поэтому обычно прибегают к различным методикам измерений. Рассмотрим эти методики подробнее. В первой методике, описанной в [3] и [4], на пути пучка между выпускным окном ускорителя и коллектором тока (цилиндр Фарадея) помещают тонкую пластинку из алюминия и измеряют ток, затем толщину пластины увеличивают (добавляют еще одну пластину) и регистрируют уменьшение тока в коллекторе и т.д. Типичный вид зависимости проходящего тока от числа пластин, т.е. от толщины поглотителя, представлен на рис. 1.

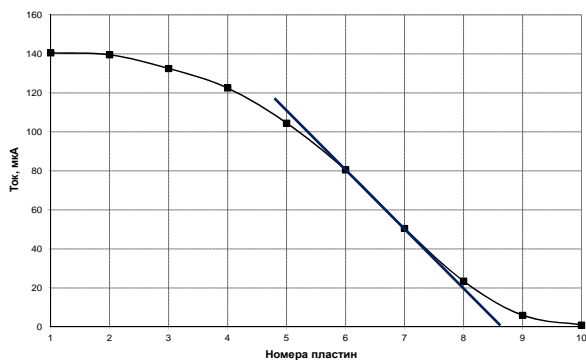


Рис. 1. Зависимость проходящего тока от числа пластин

За полный пробег принимают толщину поглотителя, получающееся при пересечении касательной к точке перегиба резко падающей части кривой (рис. 1) с осью абсцисс. Большое число измерений и связанное с этим число выключений СВЧ питания ускорителя и его инжектора приво-

дит к невысокой точности из-за неидентичности восстанавливаемых условий режима работы ускорителя.

Более точный метод измерений, свободный от указанных недостатков, был предложен в работе [5]. Измерительная сборка представляла собой набор алюминиевых пластин, изолированных друг от друга. Сама сборка помещалась внутрь цилиндра Фарадея. Включение пластин осуществлялось дистанционно в ручном режиме, при этом непрерывно отслеживался и корректировался полный средний ток пучка.

Измерительная сборка в этой работе состояла из 10 изолированных между собой 2 мм алюминиевых пластин, коммутация которых проводилась дистанционно в ручном режиме. Геометрия сборки предварительно была просчитана в программе С-007 методом Монте-Карло [6] для определения выделения зарядов на пластинах для моно энергий в диапазоне от 1 до 10 МэВ с шагом 0,5 МэВ. Сравнивая измеренное распределение с расчетными, можно было оценить величину средней энергии пучка ускоренных электронов. На рис. 2 показаны измеренное и некоторые расчетные распределения зарядов, полученные на ускорителе ЛУ-8-2.

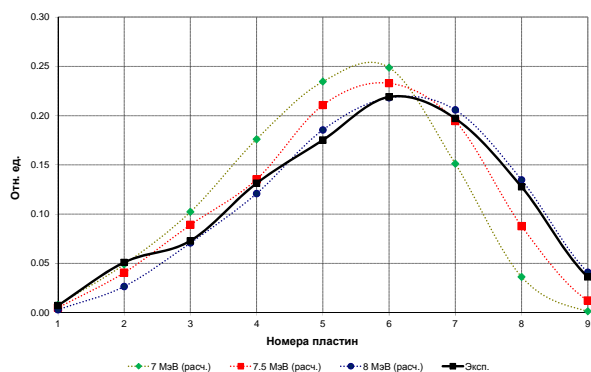


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные распределения зарядов по пластинам для ускорителя ЛУ-8-2

Более полную энергетическую характеристику пучка можно получить, восстановив энергетический спектр электронов из распределения зарядов поглощенных в пластинах сборки. Для этой цели была разработана новая измерительная сборка, позволяющая легко перестраивать ее геометрию в зависимости от средней выходной энергии электронов конкретного ускорителя. Для ускорителя ЛУ-10-20 была выбрана геометрия, включающая 20 алюминиевых пластин толщиной 1 мм с зазором между ними 2 мм. Внешний вид сборки показан на рис. 3. Схема включения пластин приведена на рис. 4.

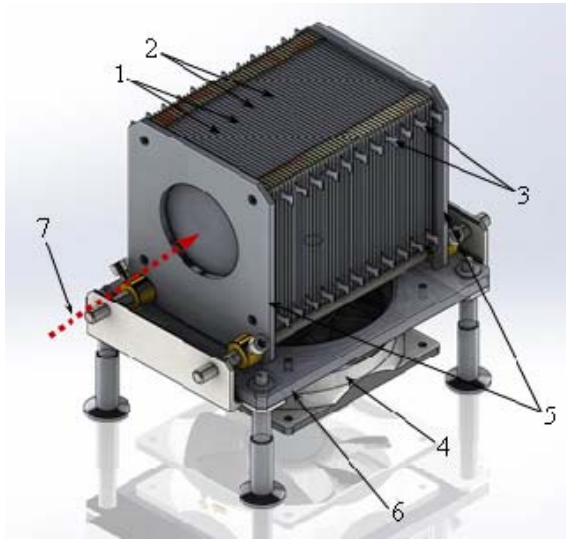


Рис. 3. Измерительная сборка: 1 – алюминиевые пластины; 2 – изоляция между пластинами; 3 – выводы для снятия тока; 4 – вентилятор; 5 – стягивающие фланцы; 6 – несущий каркас; 7 – направление оси пучка

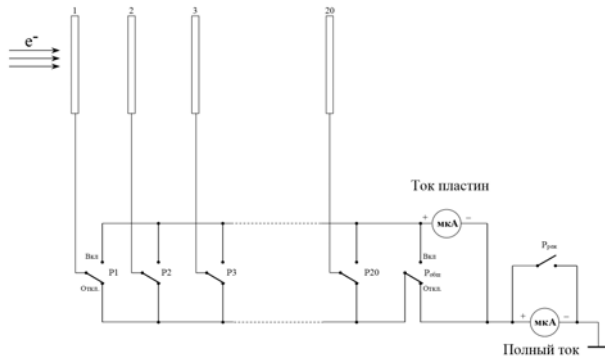


Рис. 4. Схема включения пластин измерительной сборки: (1...20) – пластины; P1...P20, P_{общ}, P_{реж} – переключатели

Сборка была просчитана в программе С-007 методом Монте-Карло в диапазоне энергий от 1 до 10 МэВ с шагом 0.5 МэВ. Результаты расчета приведены на рис. 5.

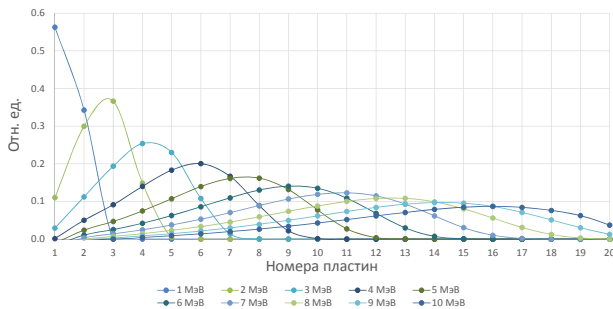


Рис. 5. Расчетные распределения зарядов по пластинам для сборки из 20 пластин

2. Описание программы восстановления энергетического спектра

Для восстановления спектра пучка из распределения зарядов по пластинам измерительной сборки, необходимо решить систему из 20 уравнений (число пластин) с 19 переменными (число энергий – 1, 1.5, 2, ..., 10 МэВ). В матричной записи система выглядит так:

$$A \cdot X = B, \quad (2)$$

где A – матрица размерностью $[m \times n]$; X – вектор-столбец переменных длиной n ; B – вектор-столбец действительных чисел длиной n .

Коэффициентами матрицы A служат расчетные заряды, первый столбец матрицы содержит заряды по пластинам для энергии 1 МэВ, второй столбец – для энергии 1,5 МэВ и т.д. Искомый вектор X содержит вклады зарядов для каждой энергии, т.е. энергетический спектр. Вектор B содержит измеренные значения зарядов на каждой пластине.

Для решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) (2) был выбран метод наименьших квадратов (МНК). Очевидно, что точного и однозначного решения данная система уравнений не имеет, из-за погрешности измерений и упрощений расчетной модели. Поэтому следует говорить о нахождении псевдорешения СЛАУ (2), при котором достигается минимум евклидовой длины вектора невязок:

$$\|B - A \cdot X\|_2 \rightarrow \min \quad (3)$$

Решение системы уравнений может содержать отрицательные значения, которые нам не подходят. Поэтому, на решения было дополнительно наложено ограничение – $X \geq 0$. Реализация такого алгоритма была предложена в работе [7] и использована в разработанной компьютерной программе «Спектр».

Код программы реализован на языке С++. Главное окно программы (рисунок 6) разделено на две части. Левая область предназначена для визуализации расчетных и измеренных значений зарядов, а также для вывода распределения зарядов, соответствующего найденному энергетическому спектру. В правой области выводится спектр и значение средней энергии пучка. На рисунке 6 показан результат восстановления энергетического спектра по измерениям, проведенным на ускорителе ЛУ-8-2 (см. рис. 2). Как видно, спектр находится в хорошем соответствии с проведенной оценкой средней и максимальной энергии. В левой области окна, линиями черного цвета соединены измеренные значения токов на 10 пластинах. Ли-

нии красного цвета отражают результат приближения псевдорешения системы уравнений.

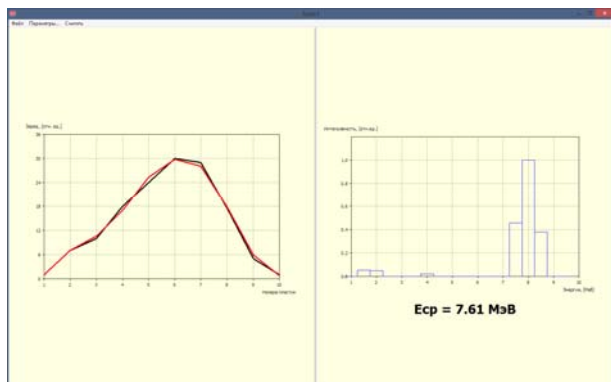


Рис. 6. Главное окно программы «Спектр» с результатами расчета для ускорителя ЛУ-8-2

3. Описание системы контроля энергии пучка

Система автоматизированного контроля энергии пучка ускорителя представляет собой блок одноканального аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) и набор реле, переключающих по команде с персонального компьютера (ПК) на вход АЦП соответствующую измерительную пластину. Исходя из наличия вблизи ускорителя таких факторов воздействия на радио-электронную аппаратуру (РЭА), как тормозное излучение и электромагнитные наводки, было принято решение о разделе системы контроля энергии пучка на два блока – блока коммутации, находящегося вблизи измерительных пластин, осуществляющего переключение измерительного канала на выбранную пластину и блока измерения и управления, находящегося в соседнем помещении. Полученные в блоке измерения и управления значения тока передаются по интерфейсному кабелю в преобразователь интерфейсов и, далее, в ПК, находящийся в операторской комнате.

Структурная схема автоматизированной системы контроля энергии пучка ускорителя приведена на рис. 7. Общий вид системы приведен на рис. 8.



Рис. 7. Структурная схема системы контроля энергии пучка



Рис. 8. Общий вид системы контроля энергии пучка ускорителя

4. Испытание системы контроля энергии

4.1. Оценка уровня наводок

Оценка уровня наводок на входе АЦП производилась при работе ускорителя в «Режиме 2», при котором рассинхронизация по времени импульсов модулятора магнетрона и инжектора электронов составляет 6 мкс, т.е. без генерации пучка.

Наблюдаемое напряжение смещения в – 190 мкВ (рис. 9) равно напряжению смещения, наблюдавшемуся при отладке блока измерения и управления без ускорителя, т.е. можно сделать вывод об отсутствии наводок на блок измерения и управления.

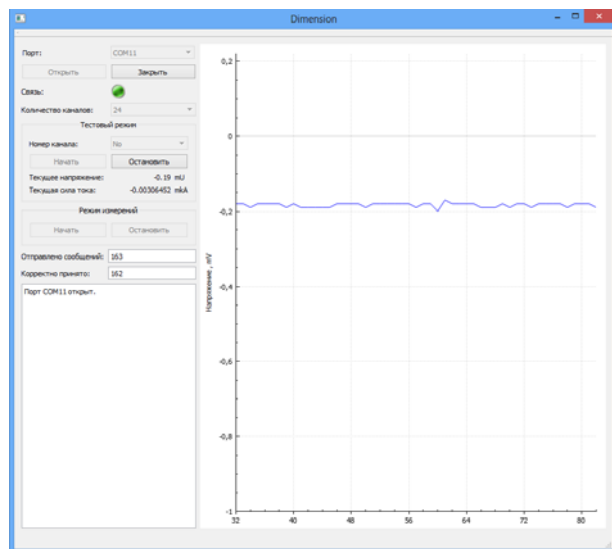


Рис. 9. Шумовое напряжение на входе АЦП при работе ускорителя в «Режиме 2»

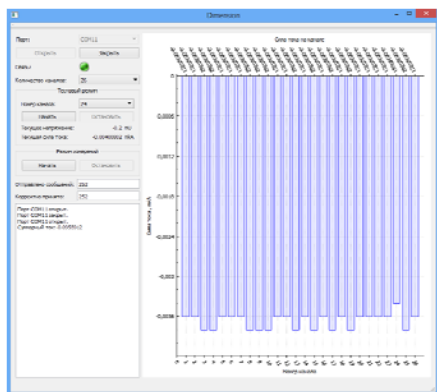


Рис. 10. Шумовое напряжение на пластинах при работе ускорителя в «Режиме 2»

Оценка уровня шумов при подключении пластин производилась путём опроса всех пластин в «Режиме измерений». Результат измерения приведён на рис. 10.

Как видно из рисунка, напряжение смещения на входе в АЦП составляет около 0,2 мВ, что соответствует току в 4 нА.

4.2. Измерение значения токов с пластин

После измерения уровня шумов, ускоритель переключили в режим генерации электронного пучка с частотой следования импульсов 100 Гц. Были проведены измерения распределения токов с пластин при различных вариантах настроек параметров ускорителя. Для оценки тока потерь от рассеянных электронов, двадцать четвёртый измерительный канал был электрически связан с корпусом сборки и металлической плитой, размещенной за измерительной сборкой.

Распределение токов с пластин при работе ускорителя в режиме генерации пучка электронов приведено на рис. 11.

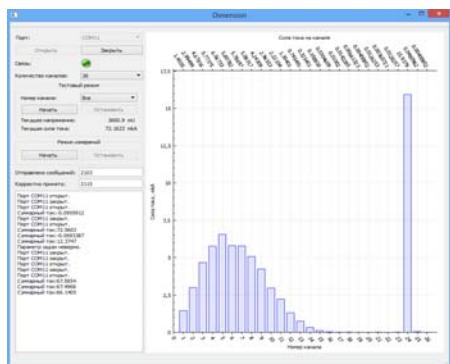


Рис. 11. Распределение токов с пластин при работе ускорителя в режиме генерации пучка

Суммарные токи с пластин и токи «потерянных» электронов, собираемых в измерительном

канале № 24 для разных режимов работы ускорителя представлены в табл. 1.

Таблица 1

Доля «потерянных» электронов

№	Суммарный ток, мкА	Ток «потерянных» электронов», мкА	Отношение токов, %
1	66,14	15,94	24,1
2	51,11	10,4	20,35
3	72,56	13,97	19,3
4	46,39	9,48	20,4

5. Результаты измерений энергии и восстановления энергетического спектра

Была проведена серия измерений при разных режимах работы ускорителя. Высокое напряжение на электронной пушке изменяли от 25 до 35 кВ. Мощность СВЧ варьировалась от 15 до 17,5 кВт. Рабочую СВЧ частоту перестраивали с 1818,3 до 1819,5 МГц.

На рисунке 12 показаны нормированные распределения токов пластин, полученные при различных настройках входных параметров ускорителя и соответствующие им восстановленные энергетические спектры. Настройки ускорителя менялись таким образом, чтобы максимум тока приходился на пластины с разными номерами. По диаграммам спектров можно сказать, что при смещении максимального тока в сторону пластин с большим номером, в общем случае, средняя энергия электронов возрастает, а пик спектра смещается в сторону большей энергии.

В заданных диапазонах, наибольшее влияние на выходные параметры пучка зарегистрировано при сдвиге СВЧ частоты. В меньшей степени изменение наблюдалось при изменении средней СВЧ мощности. Величина амплитуды высоковольтного импульса модулятора электронной пушки заметного влияния на распределение токов по пластинам не показала.

Наиболее интересным было сравнение спектра, измеренного методом поглощающих фильтров со спектром, полученным методом магнитного спектрометра, роль которого играл сканирующий магнит, во время последней аттестации ускорителя ЛУ-10-20.

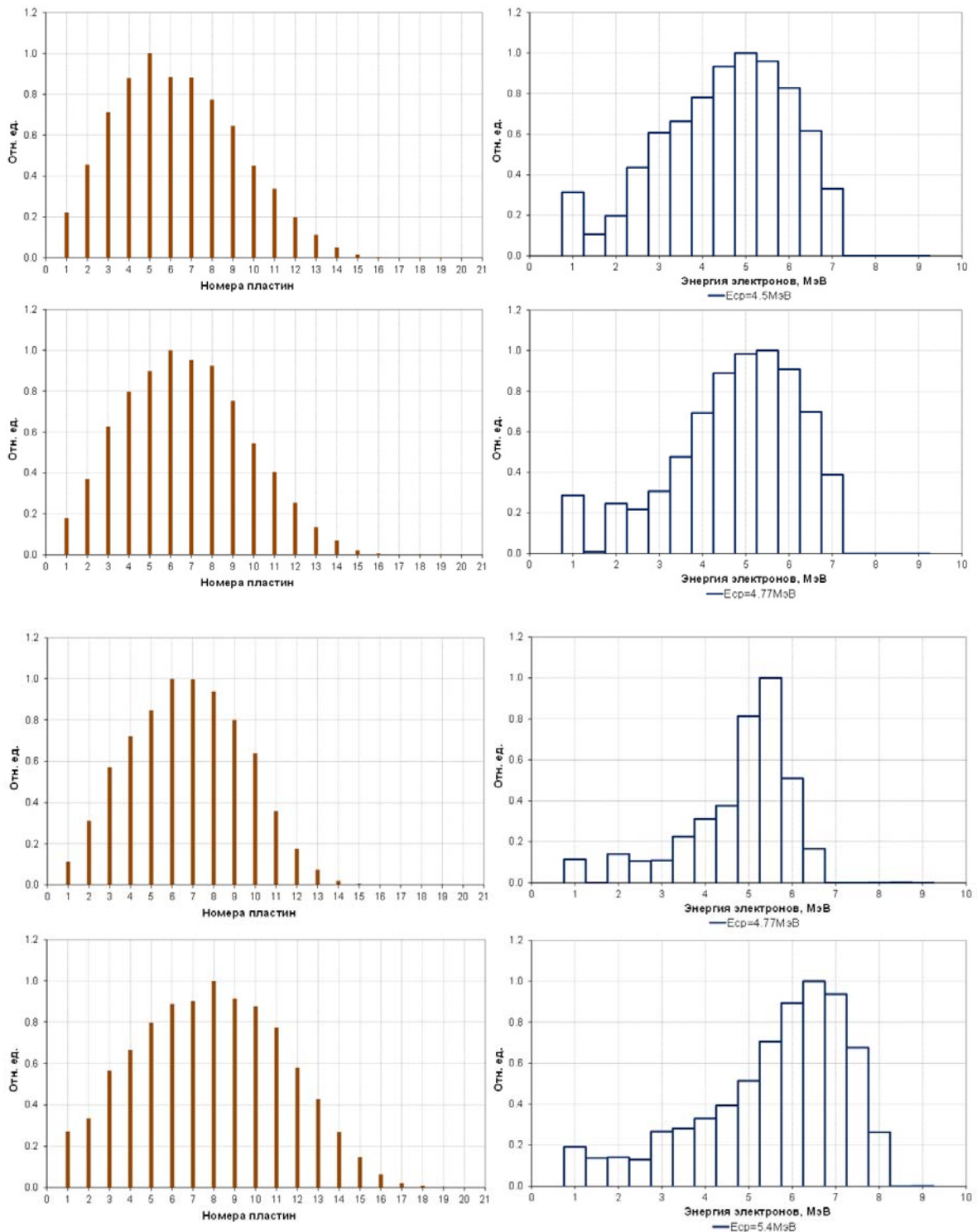


Рис. 12. Распределения токов по пластинам (левая колонка) и соответствующие им восстановленные энергетические спектры (правая колонка)

Оба спектра были измерены при работе ускорителя ЛУ-10-20 на частоте 1819,3 МГц со средней мощностью СВЧ питания 17 кВт. На рис. 13, красной линией показан спектр, измеренный методом магнитного спектрометра. Гистограмма отражает

результаты измерений методом поглощающих фильтров.

Очевидно, что соответствие восстановленного спектра реальному тем лучше, чем менее «размазанным» оказывается реальный спектр. Оптималь-

ная «узкая» форма спектра получается, когда импульсная мощность СВЧ питания ускоряющей секции близка к расчетной. Анализ большого числа решений СЛАУ разными методами показал, что величина средней энергии и «пик» спектра меняются незначительно по сравнению с формой спектра, что позволяет считать определение средней энергии и «пика» удовлетворительным.

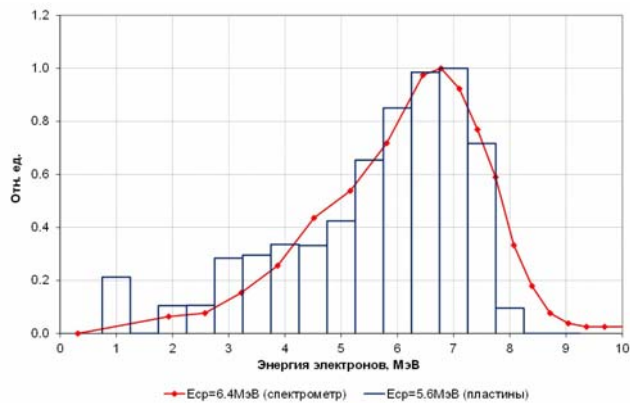


Рис. 13. Энергетические спектры электронов, полученные с помощью магнитного спектрометра и методом поглощающих фильтров ($f_0=1819,3$ МГц, $P_{ср}=17$ кВт)

Заключение

Разработан и испытан экспериментальный образец системы контроля выходной энергии электронного пучка ускорителя ЛУ-10-20.

Были проведены следующие работы:

- разработан экспресс-метод контроля выходной энергии электронного пучка;
- разработана конструкция измерительной сборки;
- проведено численное моделирование измерительной сборки;
- разработана компьютерная программа, предназначенная для восстановления энергетического спектра по распределению поглощенных зарядов в пластинах измерительной сборки;
- разработана система автоматизированного контроля выходной энергии;
- испытана система автоматизированного контроля энергии на ускорителе ЛУ-10-20.

По результатам испытаний системы автоматизированного контроля энергии пучка можно сделать следующие выводы:

- система контроля энергии позволяет измерять значения токов с пластин с точностью 1 %;
- время измерения системой значений токов составило 91 секунду, что пока не позволяет осу-

ществлять измерение спектра энергии в режиме реального времени. Данный недостаток может быть исправлен путём создания многоканальной системы измерения на $N+1$ канал, где N – количество пластин в сборке. Применение данной схемы позволит отображать изменение значения токов со скоростью около 1 кадра в секунду, а время точного измерения значений токов ориентировочно составит 3 секунды;

– проведенные испытания разработанного образца системы измерения энергии подтвердили правильность схемных решений и возможность использования расчетной модели для оперативного контроля энергии электронного пучка в режиме реального времени.

Список литература

1. Завьялов Н. В., Тельнов А. В., Хохлов Ю. А. и др. Промышленный линейный ускоритель электронов ЛУ-10-20 // Материалы XV Всесоюзного семинара по линейным ускорителям заряженных частиц. -ВАНИТ.-Сер. Ядерно-физические исследования. Вып. 2,3 (29, 30), 1997, С. 39–41.
2. А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др. Физические величины: Справочник под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. Москва: Энергоатомиздат, 1991.– 1232 с.
3. Э. Сегре. Экспериментальная ядерная физика. Перев. с англ. Т. 1. Москва: Изд-во иностр. лит., 1955.– 286 с. скалёв В. А. и Сергеев Г. И. Измерение параметров пучков заряженных частиц. Москва: Энергоатомиздат, 1991–240 с.
4. Милованов О. С., Смирнов И. А. Экспресс-метод измерения энергии пучка ускоренных электронов //Ускорители. Москва: Атомиздат, 1969. Вып. XI. С. 57–60.
5. А. К. Житник, Е. Н. Донской, С. П. Огнев, А. В. Горбунов, А. Н. Залялов, Н. В. Иванов, А. Г. Малькин, В. И. Рослов, Т. В. Семёнова, А. Н. Субботин. Методика С-007 решения етодом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов // ВАНТ Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2011. Вып. 1. С. 17–24.
6. Ч. Лоусон, Р. Хенсон. Численное решение задач метода наименьших квадратов. Москва: Наука, 1986. – 231 с.