

ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ ПОЛОЖЕНИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПРИ ЕГО ТРАНСПОРТИРОВКЕ

Л. Е. Поляков, Н. Н. Курапов, А. М. Опекунов, А. Н. Шейн, И. В. Шориков, И. А. Юрьев

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

В РФЯЦ-ВНИИЭФ ведутся работы по созданию резонансного ускорителя электронов БЕТА-8 [1, 2]. Ускоритель даст возможность получения пучков электронов с энергиями 1,5, 4,5, 7,5 МэВ и средней мощностью пучка до 300 кВт.

С учетом заявленной мощности обязательным требованием является контроль поперечного положения пучка на всех участках его транспортировки. С этой целью разработана система диагностики и корректировки положения пучка, в которую входят монитор положения пучка на основе емкостных датчиков и магнитный корректор. Данная система способна реагировать на изменение траектории пучка и возвращать его в заданное положение.

Испытания разработанного оборудования проведены на созданном экспериментальном стенде на основе высокочастотного (ВЧ) инжектора ускорителя электронов БЕТА-8, предназначенного для генерирования пучка электронов со средней энергией 100 кэВ в режиме непрерывной генерации ВЧ мощности.

Для проверки работы системы диагностики и корректировки пучка использован дополнительный независимый способ определения поперечного положения электронных сгустков путем регистрации квантов тормозного излучения, генерируемых при взаимодействии электронного пучка с материалом мишени.

В эксперименте пучок поочередно отклонялся от изначальной траектории в двух разных плоскостях силой, создаваемой магнитным полем корректора, что фиксировалось цифровой камерой в режиме реального времени. Монитор положения устанавливался в канал транспортировки пучка на испытательном стенде. Сравнивая сигналы с датчиков монитора и изображение, получаемое с камеры, определялась корректность работы монитора.

Введение

Максимальная проектная энергия электронов в резонансном ускорителе электронов БЕТА-8 7,5 МэВ достигается после пятикратного прохождения электронного пучка через ускоряющий коаксиальный резонатор, работающий на частоте 100 МГц [1] (рис. 1).

Возможность многократного прохода электронов через ускоряющие зазоры резонатора достигается с помощью поворотных электромагнитов, расположенных снаружи корпуса резонатора 4, рис.1.

Учитывая высокую мощность (до 300 кВт) и сложность траектории электронного пучка, необходимо минимизировать потери электронов в стенках резонатора и каналах магнитной транспортировки. Отклонение траектории электронного пучка от проектной может быть вызвано разными причинами:

- погрешностью юстировки элементов тракта проводки электронного пучка,
- взаимным влиянием близко расположенных поворотных магнитов,
- изменением средней энергии электронов в сгустке, связанным с расстройкой резонансной системы вследствие изменения микроклимата.

В связи с вышесказанным, для минимизации потерь электронов на участках ускорения и транспортировки разработана система диагностики и корректировки положения электронного пучка [3, 4],

способная отслеживать и корректировать траекторию электронных сгустков в режиме реального времени.

В разработанную систему входит монитор положения электронного пучка на основе емкостных датчиков [3] и магнитный корректор, обеспечивающий угловую корректировку электронного пучка в канале магнитной транспортировки [4].

Экспериментальный стенд для испытания диагностического оборудования

Испытания системы диагностики и корректировки электронного пучка проведены на экспериментальном стенде [5], включающем в себя ВЧ инжектор электронов, способный генерировать пучок электронов со средней энергией до 100 кэВ в непрерывном режиме [6], и диагностическое оборудование. Длительность сгустков электронов, получаемых на ВЧ инжекторе, составляет ~ 1 нс, заряд в сгустке – 0,4 нКл. Средний ток электронного пучка в эксперименте составлял ~ 40 мкА.

Схематическое изображение стенда показано на рис. 2. Четвертьволновый коаксиальный резонатор инжектора запитывается через индуктивный ввод ВЧ мощности от ВЧ лампового генератора со средней мощностью до 16 кВт (тетрод ГУ-92А) [6].

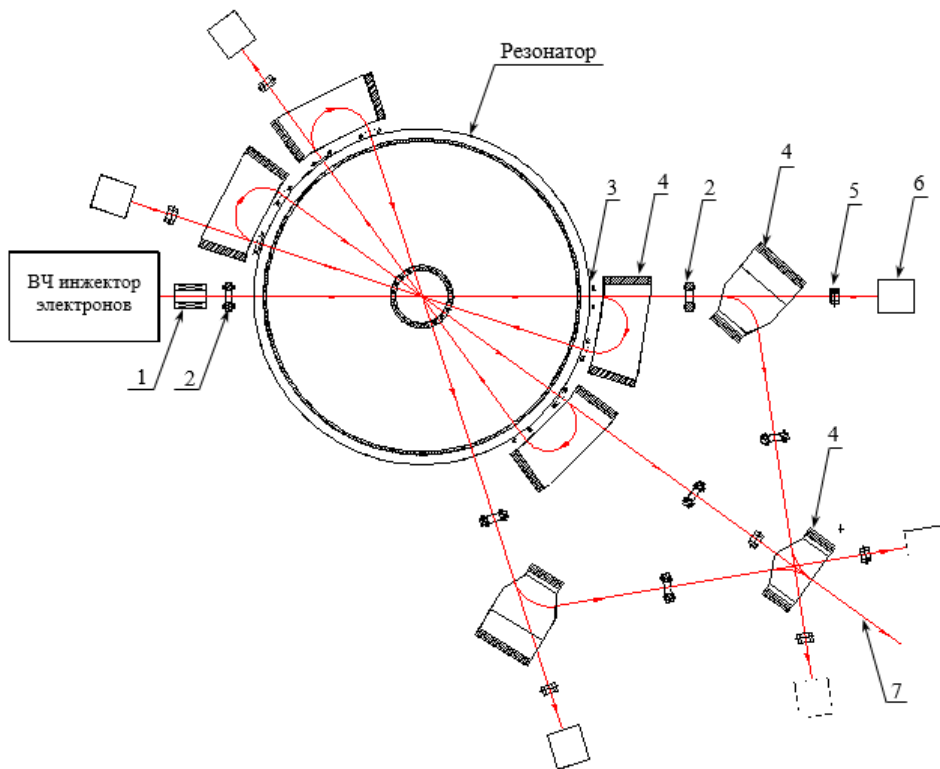


Рис. 1. Схема ускорения: 1 – фокусирующий соленоид; 2 – магнитная квадрупольная линза; 3 – магнитный корректор положения электронного пучка; 4 – поворотный дипольный магнит; 5 – монитор положения электронного пучка; 6 – поглотитель электронного пучка; 7 – выводной канал

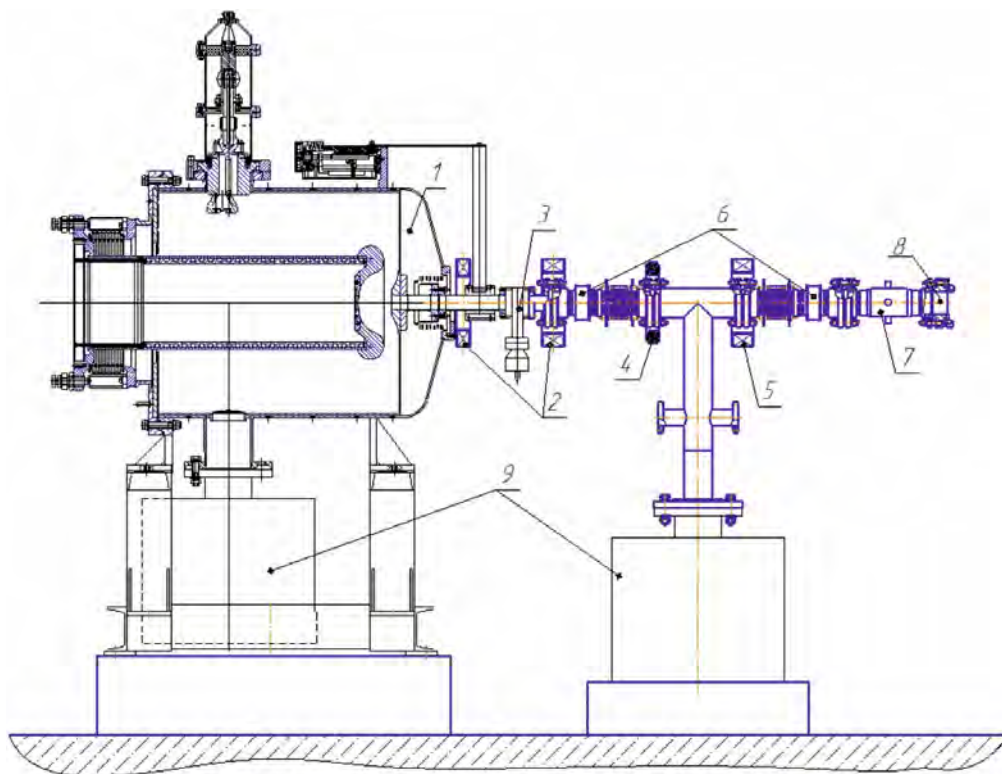
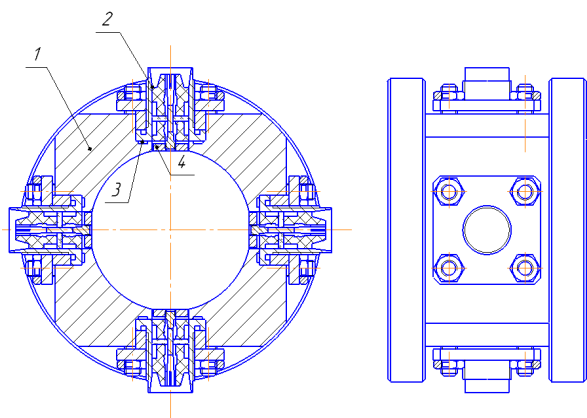
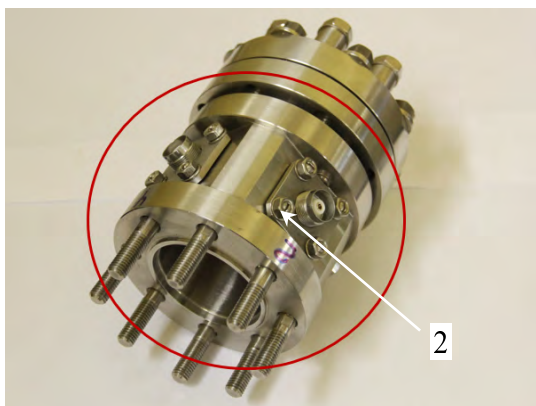


Рис. 2. Схематическое изображение диагностической части стенда: 1 – ВЧ инжектор электронов; 2 – фокусирующие соленоиды; 3 – высоковакуумный шибер ДУ40; 4 – магнитный корректор положения электронного пучка; 5 – фокусирующий соленоид для получения необходимого профиля электронного пучка на оконечном устройстве; 6 – резистивные датчики импульсного тока; 7 – монитор положения электронного пучка; 8 – выпускная титановая фольга; 9 – магниторазрядные насосы

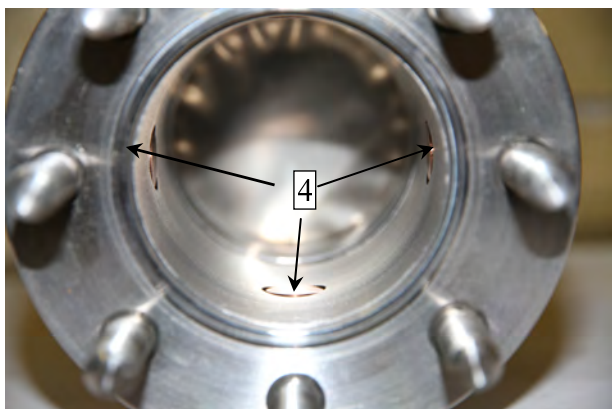
Монитор положения электронного пучка, рис. 3, представляет собой цилиндрическую камеру 1 и четыре емкостных датчика в виде дискообразных электродов 4, установленных диаметрально противоположно и электрически изолированных от стенок камеры [3]. Каждый емкостной датчик 4 соединен с внешней электрической цепью через вакуумный разъем 2, предназначенный для подключения кабельных линий с волновым сопротивлением 50 Ом.



а



б

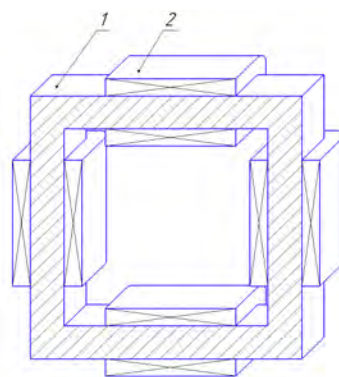


в

Рис. 3. Монитор положения электронного пучка: а – конструкция; б, в – внешний вид: 1 – корпус (камера); 2 – разъем СРГ-50-312Ф; 3 – индиевая прокладка; 4 – емкостной датчик

Принцип определения положения электронного пучка в пространстве основан на сравнении амплитуд напряжений сигналов с двух противоположных емкостных датчиков [7, 8]. Так как датчики равноудалены от центральной оси камеры, то при пролете электронного сгустка по оси они должны регистрировать одинаковые сигналы, а при его отклонении по одной из поперечных осей сигнал изменяется на соответствующей паре емкостных датчиков. Причем, чем меньше расстояние от одного из емкостных датчиков до центра масс электронного пучка, тем выше наводимое напряжение. Данный метод диагностики на всех участках траектории оказывает минимальное воздействие на электронный пучок.

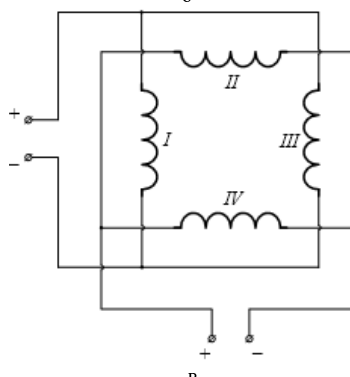
Магнитный корректор положения электронного пучка, рис. 4, представляет собой электромагнит с замкнутым магнитопроводом 1, рис. 4а, квадратной формы. На каждой стороне сердечника расположены одинаковые обмотки питания 2.



а



б



в

Рис. 4. Магнитный корректор положения электронного пучка: а – конструкция: 1 – магнитопровод, 2 – обмотка питания; б – внешний вид, в – схема включения обмоток питания

На рис. 4в показана схема включения обмоток питания. При включении вертикальных обмоток магнитный корректор отклоняет электронный пучок в горизонтальной плоскости, при включении горизонтальных обмоток – в вертикальной плоскости. При подаче питания на обе пары обмоток пучок можно отклонять в произвольном направлении.

Независимый способ регистрации электронных сгустков

Для верификации работы системы диагностики и корректировки электронного пучка использован дополнительный независимый способ регистрации параметров электронного пучка, основанный на наблюдении за изменением поперечного профиля сгустка электронов в эксперименте. Для этого электронный пучок необходимо вывести в атмосферу. Вывод низкоэнергетичных электронов (до 100 кэВ) в атмосферу для последующей диагностики их параметров представляет сложность из-за малой величины пробега электронов такой энергии в веществе.

В опыте, на конце канала магнитной транспортировки электронного пучка установлено вакуум-атмосферное окно с выпускной титановой фольгой толщиной 50 мкм (рис. 2, поз. 8). Согласно расчетам [9] максимальный пробег электронов с энергией 100 кэВ в титане ~33 мкм. Поэтому оценку положения электронного сгустка на выходе канала магнитной транспортировки можно произвести по распределению квантов тормозного излучения, возникающего в результате взаимодействия электронов с веществом фольги. Вплотную к фольге со стороны атмосферы установлен сцинтилляционный экран на основе кристалла CsI. Картина свечения сцинтиллятора под воздействием тормозного излучения регистрировалась с помощью видеокамеры. Получаемое изображение в режиме реального времени выводилось на пульт оператора, обеспечивая возможность визуального мониторинга как положения, так и формы пучка тормозного излучения [10].

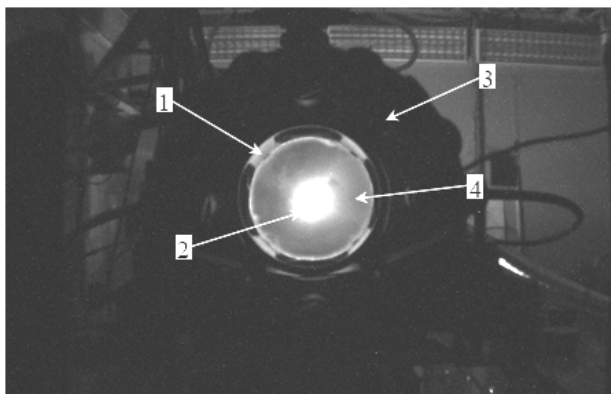


Рис. 5. Картина свечения сцинтилляционного экрана: 1 – оснастка для сцинтилляционного экрана; 2 – изображение свечения кристалла CsI; 3 – фланец с закрепленной титановой фольгой; 4 – сцинтилляционный экран

На рис. 5 представлено изображение распределения квантов тормозного излучения в поперечном сечении для случая проводки электронного пучка по центру в канале магнитной транспортировки стенда измерительного ВЧ инжектора электронов, снятое на цифровую видеокамеру.

Испытание системы диагностики и корректировки при пониженной мощности электронного пучка

В эксперименте монитор положения электронного пучка устанавливался в канал магнитной транспортировки на экспериментальном стенде как показано на рис. 2, поз. 7. Перед проведением контрольных испытаний работоспособности монитора положения электронного пучка была проведена его калибровка [3].

В процессе калибровки установлено, что при одинаковых условиях имеет место расхождение в показаниях емкостных датчиков, что обусловлено неидентичностью в изготовлении данных узлов. Эта проблема устранена путем расположения диаметрально противоположно пары емкостных датчиков, имеющих близкую чувствительность.

Корректность работы емкостных датчиков и монитора положения электронного пучка в целом фиксировалась независимым способом с помощью цифровой видеокамеры, установленной напротив выпускной фольги. Сравнивая сигналы с емкостных датчиков монитора положения электронного пучка и изображение, получаемое с видеокамеры, можно определить правильность работы монитора положения и магнитного корректора.

На рис. 6 приведены осциллограммы импульсов с емкостных датчиков для случая распространения электронного пучка по оси канала магнитной транспортировки.

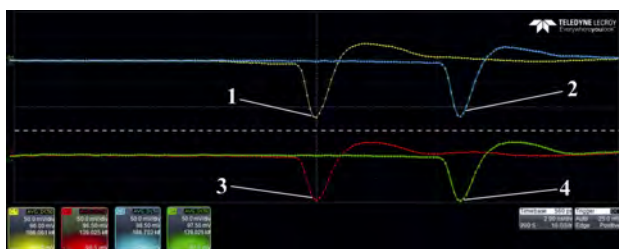


Рис. 6. Осциллограмма импульсов с емкостных датчиков при прохождении электронного пучка без отклонения: 1 – верхний датчик, 2 – нижний датчик, 3 – правый датчик, 4 – левый датчик

Согласно полученной осциллограмме амплитуды импульсов с верхнего и нижнего емкостных датчиков составляют 121 мВ и 120,5 мВ, соответственно. Амплитуды импульсов с левого и правого емкостных датчиков составляют 96,5 мВ и 97,5 мВ, соответственно. Видно, что с противоположных емкостных датчиков приходят примерно одинаковые импульсы, как и предполагалось ранее при проведении

лабораторной калибровки. Различие в амплитуде емкостных датчиков также может быть обусловлено неоднородностью проводящих линий.

Ранее в работе [3] были получены расчетные импульсы напряжений (рис. 7) на емкостных датчиках при прохождении электронного пучка со средней энергией 100 кэВ вдоль центральной оси канала транспортировки равноудаленно от каждого из четырех емкостных датчиков. Динамические параметры электронного пучка определены в работе [5].

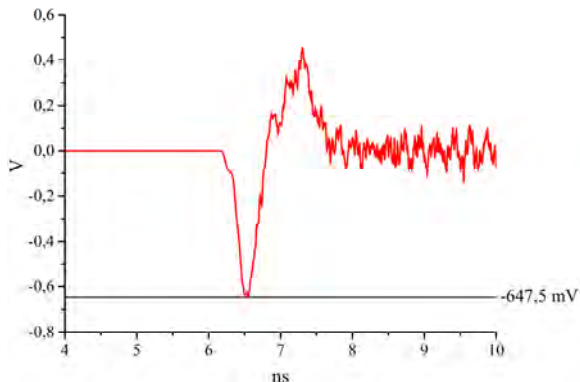


Рис. 7. Расчетная форма импульсов напряжений с емкостных датчиков (энергия электронов 100 кэВ, электронный пучок проходит по оси канала транспортировки)

Из рис. 7 видно, что расчетная амплитуда напряжения емкостного датчика составляет 647,5 мВ.

Отличие экспериментальных данных от расчетных объясняется наличием ослабления сигнала в проводящей линии, представляющей собой радиочастотный кабель РК50-4-21.

Ослабление сигнала в кабеле определяется согласно формуле [11]:

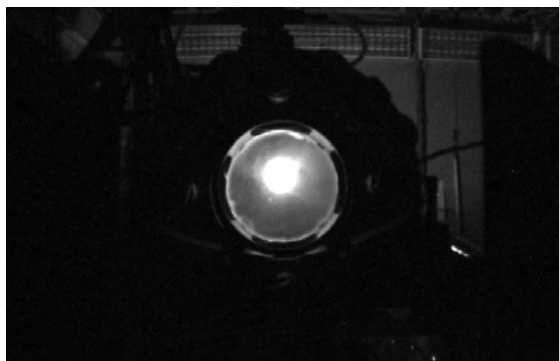
$$\delta \cdot l = 10 \lg \frac{P_{\text{ВХ}}}{P_{\text{ВЫХ}}} = 20 \lg \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}},$$

где $U_{\text{ВХ}}$ и $P_{\text{ВХ}}$ – напряжение и мощность, поступающие на вход рассматриваемой линии, а $U_{\text{ВЫХ}}$ и $P_{\text{ВЫХ}}$ – напряжение и мощность, поступающие с выхода линии в согласованную нагрузку; δ – погонный коэффициент затухания, дБ/м; l – длина линии, м.

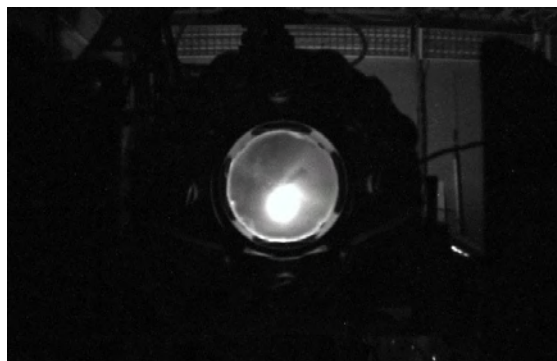
В нашем случае максимальная амплитуда принимаемого сигнала составляет 121 мВ, а длина передающего кабеля – 18 м. Погонный коэффициент затухания для кабеля РК50-4-21 на частоте 1 ГГц равен 0,8 дБ/м. Таким образом, истинная амплитуда падения напряжения на емкостном датчике составляет 635 мВ, что практически соответствует расчетной величине в 647,5 мВ.

Погрешность измерений осциллографа LeCroy WAVE PRO 7Zi-A, используемого в испытаниях, согласно паспорту на прибор составляет $\pm (1 \% + 600 \text{ мкВ})$.

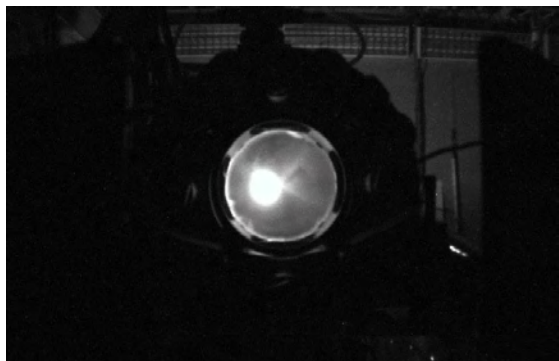
В эксперименте, при работе магнитного корректора в режиме дипольной линзы, электронный сгусток отклонялся от изначальной траектории в раз-



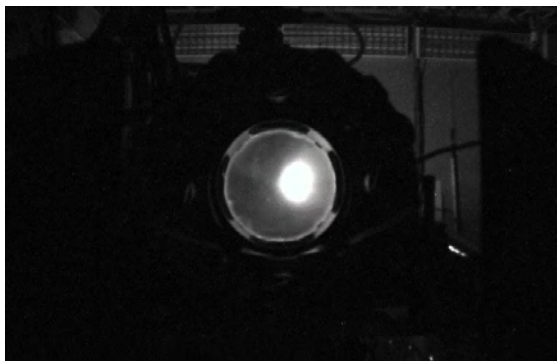
а



б



в



г

Рис. 8. Полученное в эксперименте изображение пятна при работе магнитного корректора в режиме дипольной линзы: а – смещение вверх; б – смещение вниз; в – смещение влево; г – смещение вправо

ном направлении (рис. 2, поз. 4). Для отклонения электронного пучка в необходимую сторону на соответствующие обмотки питания магнитного корректора подавался постоянный по амплитуде ток величиной 0,2 А. Величина индукции магнитного поля на центральной оси канала магнитной транспортировки – 0,38 мТл.

На рис. 8 приведены результаты работы корректора в режиме дипольной линзы.

Из полученных в эксперименте изображений, можно сделать вывод, что магнитный корректор положения электронного пучка выполняет функции дипольного магнита и удовлетворяет требованиям поставленной задачи. Варьируя силу тока в обмотках питания, электронные сгустки отклоняются на необходимый угол от первоначальной траектории. Задействовав в работу сразу все четыре обмотки питания, можно отклонять электронный пучок на любой заданный угол.

Заданное смещение электронного пучка фиксировали емкостные датчики, что отображалось на осциллографе. На рис. 9 и рис. 10 представлены осциллограммы импульсов с вертикальных емкостных датчиков в случае отклонения электронного пучка по вертикали, а на рис. 11 и рис. 12 – в случае отклонения электронного пучка по горизонтали.

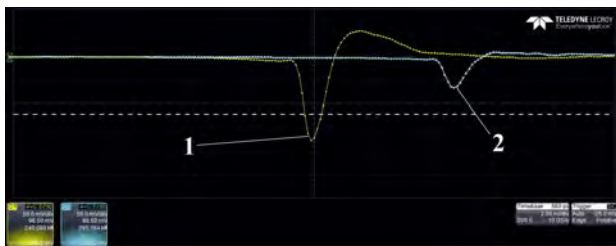


Рис. 9. Осциллограмма импульсов с вертикальных емкостных датчиков в случае отклонения электронного пучка вверх: 1 – верхний датчик; 2 – нижний датчик

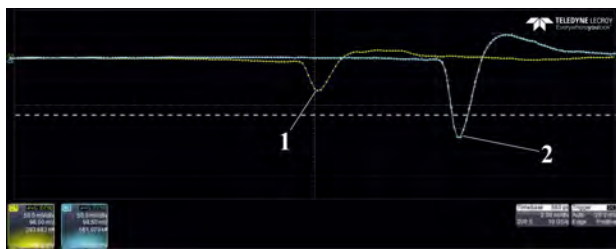


Рис. 10. Осциллограмма импульсов с вертикальных емкостных датчиков в случае отклонения электронного пучка вниз: 1 – верхний датчик; 2 – нижний датчик

Как можно увидеть из осциллограмм на рис. 9–12, при приближении электронного пучка к определенному емкостному датчику наблюдается соответствующее увеличение амплитуды сигнала, а удалению электронного пучка от емкостного датчика соответствует уменьшение амплитуды импульса, что соответствует принципу работы емкостного датчика. Пунктирной линией показан уровень сигнала

соответствующих емкостных датчиков при прохождении электронного пучка по центру канала без какого-либо отклонения.



Рис. 11. Осциллограмма импульсов с горизонтальных емкостных датчиков в случае отклонения электронного пучка влево: 1 – правый датчик; 2 – левый датчик

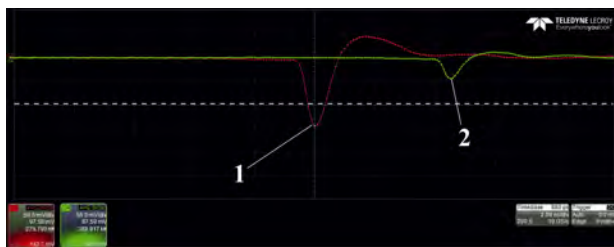


Рис. 12. Осциллограмма импульсов с горизонтальных емкостных датчиков в случае отклонения электронного пучка вправо: 1 – правый датчик; 2 – левый датчик

Отклонение амплитуды импульсов от расчетных для вертикальных емкостных датчиков составляет ~ 2 мВ, а для горизонтальных емкостных датчиков ~ 0,5 мВ.

Заключение

В связи с высокими требованиями к качеству транспортируемого электронного пучка в резонансном ускорителе БЕТА-8 разработана и изготовлена система диагностики и корректировки электронного пучка, в которую входят монитор положения и магнитный корректор. Разработанный метод диагностики оказывает минимальное воздействие на электронный пучок и позволяет оперативно реагировать на его отклонение и возвращать на требуемую траекторию.

Система диагностики и корректировки электронного пучка отработана на созданном экспериментальном стенде на основе ВЧ инжектора электронов резонансного ускорителя электронов БЕТА-8.

Корректность работы системы диагностики и корректировки положения пучка верифицировалась посредством наблюдения свечения сцинтилляционного экрана, установленного непосредственного напротив выходного окна канала транспортировки на испытательном стенде.

Испытания магнитного корректора положения электронного пучка показали его работоспособность и подтвердили описанные ранее теоретические предположения [4].

Испытания монитора положения электронного пучка также показали хорошее соответствие расчетным характеристикам. Максимальная расчетная амплитуда сигнала при прохождении электронного пучка по оси канала транспортировки составила 647,5 мВ, а экспериментальное значение амплитуды сигнала – 120 мВ. Отличие экспериментальных и расчетных данных обусловлено ослаблением сигнала в передающей линии и погрешностью измерений, что учтено при проведении анализа эксперимента.

В результате разработан и реализован способ диагностики и корректировки поперечного положения низкоэнергетичного электронного пучка (до 100 кэВ) с высокой средней мощностью в режиме реального времени.

Литература

1. Гладышев Е. Н., Гордеев В. С., Завьялов Н. В. и др. Состояние работ по проекту создания электронного резонансного ускорителя непрерывного действия БЕТА-8 // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Сер. Научно-исследовательское издание. 2015. Вып. 20. Ч. 1. С. 184–193.

2. Telnov A. V., Gordeev V. S., Zavialov N. V. et al. Progress in CW mode electron resonance accelerator BETA-8 development // Proceeding of XXV Russian Particle Accelerator Conference «RUPAC-2016». 2017. P. 185–187.

3. Поляков Л. Е., Курапов Н. Н., Опекунов А. М. и др. Разработка системы диагностики положения пучка для резонансного ускорителя электронов БЕТА-8 // Молодежь в науке: сборник докладов XV научно-технической конференции. 2017.

4. Юрьев И. А., Поляков Л. Е., Опекунов А. М. и др. Разработка магнитного корректора для системы диагностики положения пучка резонансного ускорителя электронов БЕТА-8 // Молодежь в науке: сборник докладов XV научно-технической конференции. 2017.

5. Завьялов Н. В., Кузнецов В. В., Опекунов А. М. и др. Экспериментальная отработка проводки электронного пучка ВЧ инжектора для резонансного ускорителя БЕТА-8 // Труды международной конференции «XVIII Харитоновские тематические научные чтения. Проблемы физики высоких плотностей энергии»: сборник докладов. 2017. С. 121–127.

6. Volkov V.N., Arbuzov V.S., Chernov K.N. et al. CW 100 keV Electron RF Injector for 40 mA Average Beam Current // Proceeding of XXIV Russian Particle Accelerator Conference «RUPAC-2014». 2014. P. 309–311.

7. Смалюк В.В. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях. Новосибирск: Параллель, 2009. С. 294.

8. Fork P. Lecture Notes of Beam Instrumentation and Diagnostics // Proceeding of JUAS 2011. Darmstadt. Germany. 2011. P. 152.

9. Опекунов А. М., Беляев А. Н., Кузнецов В. В. и др. Система инжекции резонансного ускорителя электронов БЕТА-8. Расчеты и эксперимент // Молодежь в науке: сборник докладов XV научно-технической конференции. 2017.

10. Жуков И. В., Мочалов М. Р. и др. Интеллектуальный визуальный датчик событий // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2010. Вып. 15. С. 506 – 513.

11. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. М: Высшая школа, 1970. С. 440.