

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА ДЛЯ РЕЗОНАНСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ БЕТА-8

*Л. Е. Поляков, Н. Н. Курапов, А. М. Опекунов, А. В. Тельнов, Э. А. Шаравин,
А. Н. Шеин, И. В. Шориков, И. А. Юрьев*

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

Создаваемый в РФЯЦ-ВНИИЭФ резонансный ускоритель электронов БЕТА-8 предназначен для генерации электронного пучка со средней энергией ускоренных электронов от 1,5 до 7,5 МэВ и средней мощностью пучка до 300 кВт [1]. Чтобы минимизировать потери электронов на стенках резонатора и в каналах транспортировки, необходимо разработать систему диагностики и корректировки положения пучка.

Для определения положения пучка разработана система электростатических датчиков, представляющая собой цилиндрическую камеру и четыре электрода (пикап-электроды) в виде небольших дисков, смонтированных заподлицо с внешней поверхностью камеры.

Разработан магнитный корректор положения пучка, который служит для изменения (корректировки) траектории пучка в поперечной плоскости. При соответствующей реализации электрической схемы питания обмоток, корректор может работать как квадрупольная линза.

Для отработки режимов работы системы диагностики были проведены тестовые испытания на лабораторном стенде. Результаты испытаний хорошо согласуются с теоретическими расчетами.

Введение

Принцип работы (рис. 1) ускорителя БЕТА-8 основан на многократном проходе электронного пучка через один ускоряющий резонатор [1]. Возможность многократного прохода электронов через ускоряющие зазоры резонатора осуществляется с помощью поворотных электромагнитов, расположенных снаружи корпуса резонатора.

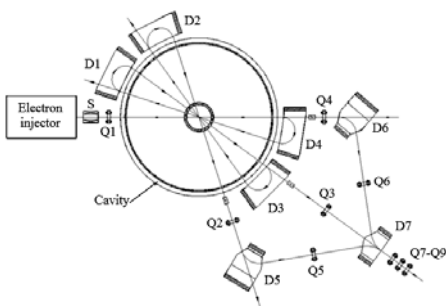


Рис. 1. Схема ускорения → – траектория движения пучка; D1 – D7 – поворотные дипольные магниты; S – соленоид; Q1 – Q9 – квадрупольные магнитные линзы

Исходя из высоких требований к качеству транспортируемого электронного пучка в ускорителе, используемый метод диагностики положения пучка на разных участках траектории должен оказывать минимальное воздействие на пучок и не разрушать его. Ниже представлены результаты разработки монитора положения пучка на основе системы емкостных датчиков.

В случае однопроходного режима работы ускорителя, рассматриваемого в настоящей работе, магнитный корректор устанавливается на выходе из резонатора. После корректора устанавливается монитор положения пучка, позволяющий диагностировать отклонение пучка от центральной оси. Управляя током в катушках корректора, можно отклонять электронный пучок на некоторые углы и, таким образом, задавать требуемое положение пучка, необходимое для успешного прохода через поворотный магнит и выхода на следующий этап ускорения.

Такую работу необходимо выполнять на каждом этапе ускорения электронов перед последовательным включением следующих поворотных магнитов.

Физические принципы действия емкостного датчика

В общем случае емкостной датчик представляет собой систему из двух проводников, один из которых является сигнальным электродом, а другой заземлен.

Идея измерений состоит в том, что электрическое поле, создаваемое пучком заряженных частиц, индуцирует ток в цепи, в которую включен электрод (рис. 2). Так как поле, создаваемое пучком, изменяется во времени, то на этом электроде мы можем определить изменяющийся во времени сигнал [2].

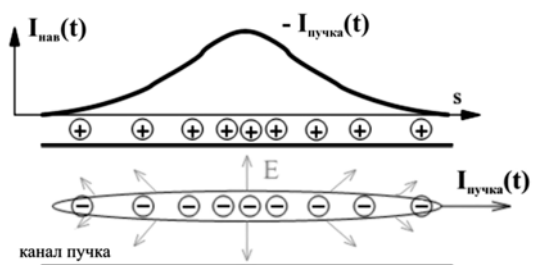


Рис. 2. Принцип работы датчика тока

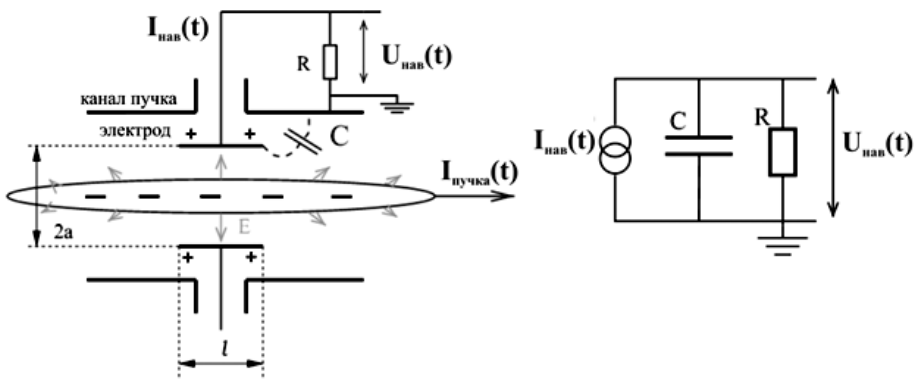


Рис. 3. Принцип работы емкостного датчика и его эквивалентная схема

Пусть пластина, расположенная на расстоянии a от оси пучка, имеет площадь A и длину l вдоль оси пучка (рис. 3).

Ток $I_{\text{нав}}$, создаваемый зарядом $Q_{\text{нав}}$, который наводится на пластину электрическим полем пролетающего пучка, определяется, как

$$I_{\text{нав}}(t) = \frac{dQ_{\text{нав}}}{dt} = -\frac{A}{2\pi a l} \frac{dQ_{\text{пучка}}(t)}{dt}. \quad (1)$$

Ток пучка электронов, имеющих скорость β , можно определить по формуле [2]

$$\frac{dQ_{\text{пучка}}}{dt} = \frac{l}{\beta c} \frac{dI_{\text{пучка}}}{dt} = -\frac{l}{\beta c} \cdot i\omega I_{\text{пучка}}(\omega), \quad (2)$$

где ток пучка выражен в частотно зависимой форме $I_{\text{пучка}}(\omega) = I_0 e^{-i\omega t}$, ω – частота ускоряющего электрического поля.

В качестве сигнала датчика принимается падающее напряжение на резисторе R

$$U_{\text{нав}}(\omega) = R I_{\text{нав}} = Z_{\text{датчика}}(\omega) \cdot I_{\text{пучка}}(\omega), \quad (3)$$

где $Z_{\text{датчика}}$ – полное сопротивление датчика.

Датчик имеет некоторую емкость C , которая определяется расстоянием от его поверхности до пучка и емкостью кабеля. Тогда, используя эквивалентную схему датчика (рис. 2), можно вычислить полное сопротивление датчика

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + i\omega C \Leftrightarrow Z = \frac{R}{1 + i\omega RC}. \quad (4)$$

В итоге напряжение на выходной цепи датчика определяется следующим образом [2]

$$U_{\text{нав}}(\omega) = \frac{R}{z + i\omega RC} \cdot I_{\text{нав}} = \frac{1}{\beta c} \cdot \frac{1}{C} \cdot \frac{A}{2\pi a l} \times \times \frac{i\omega RC}{1 + i\omega RC} \cdot I_{\text{пучка}} = Z_{\text{датчика}}(\omega) \cdot I_{\text{пучка}}(\omega). \quad (5)$$

Моделирование монитора положения пучка

Монитор положения пучка представляет собой цилиндрическую камеру и четыре электрода (пикап-электроды) в виде небольших дисков, смонтирован-

ных заподлицо с камерой. Каждый электрод подключен к внешней цепи через вакуумный ввод с согласованным сопротивлением 50 Ом (рис. 4).

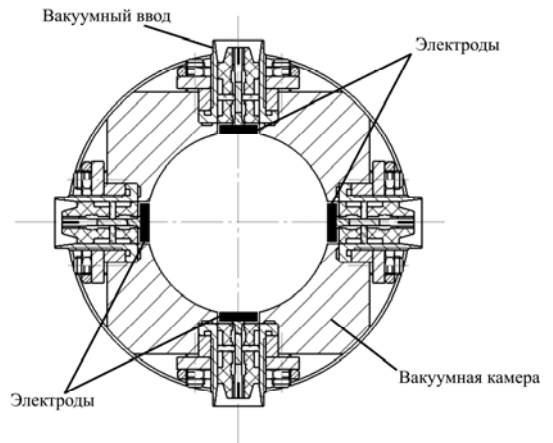


Рис. 4. Устройство монитора положения пучка

Принцип определения положения пучка основан на сравнении амплитуд напряжений сигналов с двух противоположных датчиков [3]. Так как датчики равноудалены от центральной оси камеры, то при пролете пучка вдоль нее они должны фиксировать одинаковые сигналы, а при отклонении пучка по одной из поперечных осей сигнал будет меняться на соответствующей паре датчиков (рис. 5). Причем чем меньше расстояние от одной из пластин до центра масс пучка, тем выше наводимое напряжение.

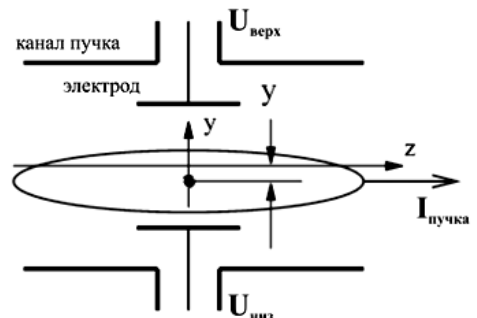


Рис. 5. Схематичное изображение работы монитора положения пучка (разность напряжений $\Delta U = U_{\text{низ}} - U_{\text{верх}}$ есть показатель отклонения пучка от оси)

Так как в качестве вакуумного ввода датчиков использован ВЧ разъем СРГ-50-312ФВ, который имеет штырь под распайку, то геометрия секции вакуумной камеры и самих датчиков выбрана с учетом размеров разъема. Апертура канала транспортировки пучка составляет 60 мм.

В программе трехмерного электродинамического моделирования построена модель монитора положения пучка. Получены расчетные импульсы напряжений на датчиках положения при прохождении электронного пучка, как по оси канала транспортировки, так и с некоторым смещением от нее.

В первом случае сигналы с датчиков считывались перед входным отверстием в резонатор на расстоянии 840 мм от катода инжектора. В плоскости эмиссии задавался заряд пучка величиной 0,4 нКл. Длительность импульса составляла 1 нс. После прохождения ускоряющего зазора ВЧ инжектора [4] и системы фокусирующих соленоидов, пучок имеет среднюю энергию 96 кэВ, максимальный поперечный размер – 15 мм. Длительность сгустка – 0,85 нс. На рис. 6 представлены смоделированные зависимости выходного напряжения с четырех датчиков положения пучка от времени, причем буквенные индексы обозначения напряжений соответствуют определенному расположению датчиков в канале транспортировки пучка.

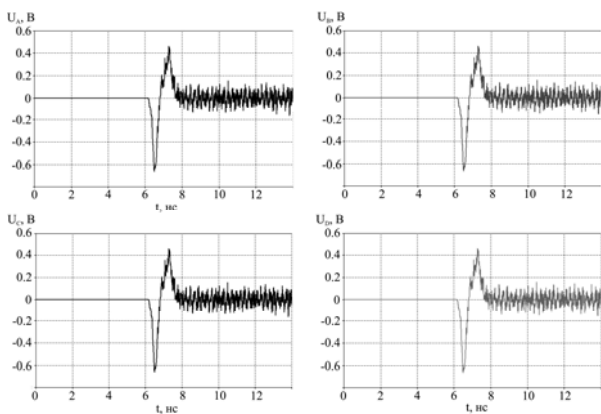


Рис. 6. Расчетные зависимости импульсов напряжений с четырех датчиков (энергия электронов 96 кэВ, пучок проходит по оси канала транспортировки)

При прохождении пучка по центру канала транспортировки все датчики имеют одинаковые пиковые значения напряжения. Минимум амплитуды напряжения составляет – 660 мВ, а максимум – 460 мВ. Время между пиками соответствует времени пролета самого электронного сгустка.

Для проверки теоретических выводов моделировалось смещение пучка по оси u на 10 мм от центра (рис. 7). Результаты моделирования представлены на рис. 8.

Сравнивая рис. 6 и рис. 8, можно сделать вывод, что уменьшение расстояния от пучка до датчика с индексом А приводит к увеличению минимального

и максимального пиковых значений амплитуды напряжений до – 1,49 В и 880 мВ. Отдаление датчика С от центра пучка приводит к снижению амплитуд напряжений до – 310 мВ и 260 мВ, соответственно. Небольшое снижение сигналов на остальных датчиках обусловлено также увеличением расстояния до пучка.

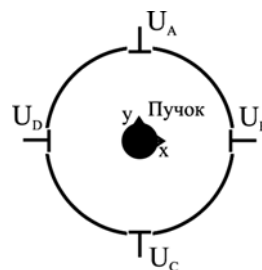


Рис. 7. Схематичное расположение датчиков в канале транспортировки пучка

В дополнение к этому были рассчитаны зависимости импульсов напряжений сигналов с датчиков монитора положения пучка, установленного после одного прохода через ускоряющий резонатор, где средняя энергия электронов составляет 1,688 МэВ. Максимальный поперечным размером пучка электронов в данном месте – 18 мм, длительность электронного импульса 0,7 нс. На рис. 9 представлены результаты данных

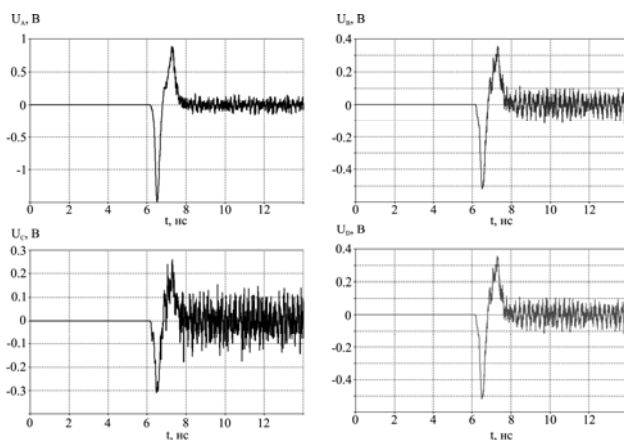


Рис. 8. Расчетные зависимости импульсов напряжений с четырех датчиков (энергия электронов 96 кэВ, пучок смещен вдоль оси u на 10 мм)

расчетов. Минимум напряжения составляет – 940 мВ, а максимум – 750 мВ. Смещение пучка на 10 мм дает увеличение амплитуды напряжения сигнала на датчике А до –1,7 В в минимуме, и до 1,1 В в максимуме, а на датчике С – 650 мВ в минимальной точке и 750 мВ – в максимальной (рис. 10).

Можно сделать вывод, что данные сигналы будет возможно зафиксировать с помощью осциллографа. При этом следует отметить, что в расчетах не учитывается реальное ослабление сигнала в передающей цепи, что может внести определенную поправку при проведении экспериментальных измерений.

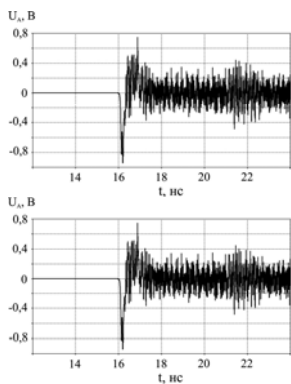


Рис. 9. Расчетные зависимости импульсов напряжений с четырех датчиков (энергия электронов 1,688 МэВ)

Экспериментальная часть

Перед проведением тестовых испытаний работоспособности монитора положения пучка была проведена его калибровка.

В процессе калибровки установлено, что при одинаковых условиях имеет место некоторая неравномерность в распределении потенциалов в датчиках, которая может быть обусловлена не полной идентичностью в изготовлении данных узлов. Эта проблема решена путем расположения попарно каждого датчика-электрода таким образом, чтобы каждый из них давал примерно одинаковый сигнал.

Для калибровочных измерений использовался возбуждающий элемент, на который подавался импульсный сигнал длительностью 100 нс с амплитудой напряжения в диапазоне 20–60 мВ. Каждый датчик

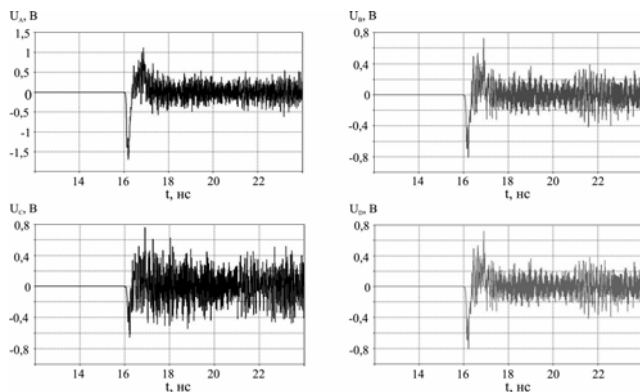


Рис. 10. Расчетные зависимости импульсов напряжений с четырех датчиков (энергия электронов 1,688 МэВ, положение пучка смещено вдоль оси у на 10 мм)

поочередно устанавливался на расстоянии 2 мм от этого возбудителя и подключался к осциллографу. Результаты калибровочных измерений амплитуд напряжений на датчиках (U_{max} , U_{min}) при различных напряжениях питающего генератора представлены в таблице.

По результатам выборки, представленным в таблице, датчики были распределены на следующие пары: 1–2 и 3–4. Несмотря на то, что сигналы датчиков из одной пары отличаются от сигналов датчиков другой, такая выборка позволяет по разности амплитуд сигналов адекватно оценивать положение пучка в канале транспортировки.

Для проведения тестовых испытаний монитора положения пучка будет использован стенд с диагностическим оборудованием для испытаний ВЧ инжектора ускорителя БЕТА-8. Схематическое изображение диагностической части стенда представлено на рис. 11.

Результаты калибровочных измерений

$U_{ген}, В$	Датчик 1		Датчик 2		Датчик 3		Датчик 4	
	$U_{max}, мВ$	$U_{min}, мВ$	$U_{max}, мВ$	$U_{min}, мВ$	$U_{max}, мВ$	$U_{min}, мВ$	$U_{max}, мВ$	$U_{min}, мВ$
20	36,8	-30	35,8	-27,6	40	-32	38	-30,8
40	54,4	-45	52,4	-42,8	58,8	-50	57,6	-48
60	71,2	-60,8	69,2	-57,8	75,2	-63,6	73,6	-61,6

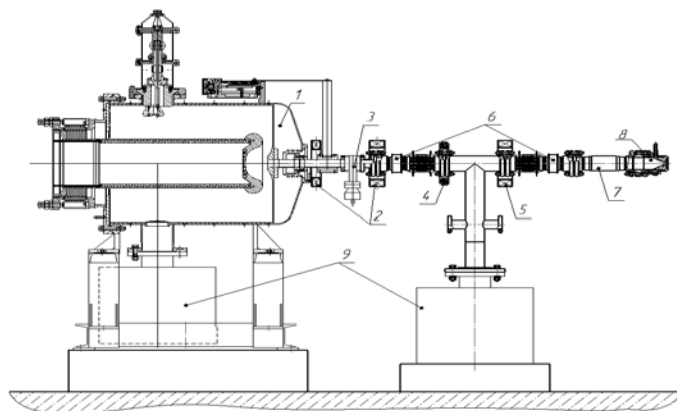


Рис. 11. Схематическое изображение диагностической части стенда: 1 – ВЧ инжектор; 2 – фокусирующие соленоиды; 3 – высоковакуумный шибер; 4 – корректор положения пучка; 5 – соленоид для получения необходимого профиля пучка на оконечном устройстве; 6 – резистивные датчики тока; 7 – монитор положения пучка; 8 – водоохлаждаемый поглотитель пучка; 9 – магниторазрядные насосы

При небольших смещениях пучка от центра датчика для вычисления координат его центра масс могут быть применены линейные комбинации сигналов с использованием масштабных нормировочных коэффициентов [3]. Для датчика, координаты центра электродов которого расположены на осях x и y (рис. 6), можно применить следующие соотношения:

$$x = M_x \frac{U_A - U_C}{U_A + U_C} \quad \text{и} \quad y = M_y \frac{U_B - U_D}{U_B + U_D}, \quad (6)$$

где U_A, U_B, U_C, U_D – выходные напряжения датчиков с обозначениями, соответствующими их схематичному расположению (рисунок 7), M_x, M_y – масштабные нормировочные коэффициенты соответствующих поперечных осей.

Аналитический расчет масштабных коэффициентов с учетом нелинейности для монитора положения пучка круглого сечения основан на применении теоремы Грина о взаимности [5]. Измерение сигналов датчиков на стенде и их последующая обработка с помощью численных методов может являться альтернативным методом расчета характеристик датчиков [6].

Заключение

В связи с необходимостью создания системы диагностики положения пучка в ускорителе БЭТА-8 спроектирован монитор положения пучка на основе емкостных датчиков. Выбор такого метода диагностики обусловлен наличием многопроходной системы проводки пучка в разрабатываемой установке и, соответственно, требованием минимизации влияния внешних возмущающих факторов на пучок.

В программе трехмерного электродинамического моделирования была создана модель монитора положения пучка, рассчитаны сигналы напряжений датчиков положения для пучка электронов.

Смоделирована работа монитора положения пучка в случае смещения центра масс сгустка относительно продольной оси. Датчик сконструирован и рассчитан таким образом, чтобы в реальных условиях можно было регистрировать импульсы напряжений с электродов непосредственно на осциллографе без предварительного усиления сигнала.

Система диагностики пучка в дальнейшем будет отработана на испытательном стенде.

Литература

1. Гладышев Е. Н., Гордеев В. С., Завьялов Н. В., Кузнецова Н. Н. и др. Состояние работ по проекту создания электронного резонансного ускорителя непрерывного действия БЭТА-8. // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Сер. Научно-исследовательское издание. 2015. Вып. 20. Ч. 1. С. 184–193.
2. Fork P. Lecture Notes of Beam Instrumentation and Diagnostics // Proc. Of JUAS 2011. Darmstadt, Germany, 2011.
3. Смалюк В. В. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях // Параллель, Новосибирск, 2009.
4. Volkov V. N., Arbuzov V. S., Chernov K. N., Kurkin G. Ya. et. al. CW 100 keV electron RF injector for 40 mA average beam current // Proceeding of XXIV Russian Particle Accelerator Conference RUPAC. 2014. P. 309–311.
5. Kim S. H. Calculating BPM Coefficients with Green's Reciprocation Theorem // Proc. Of PAC 2001. Chicago, USA, 2001. Vol. 2. P. 1348–1350.
6. Shinoe K., Nakamura N., Katsura T., Kamiya Y. Design and Calibration of Picap-Electrodes for Beam Position Monitoring at SOR-RING // Proc. Of PAC 1993. Washington, USA, 1993. P. 2337–2339.