

Реферат

Выпускная квалификационная работа 86 с., 17 рис., 18 табл., 25 источников, 3 прил.

Ключевые слова: автоматизация испытаний, радиационная стойкость, фотоэлектрический элемент, циклотрон, токосъемник, коллиматор, центр тяжести пучка заряженных частиц.

Объектом исследования является процесс испытаний изделий полупроводниковой электроники на радиационную стойкость.

Цель работы – проведение предпроектного анализа системы автоматизации процесса испытаний на радиационную стойкость.

В результате исследования получена оценка толщины токосъемника; получена зависимость тока на токосъемнике от ширины токосъемника, размера коллиматора, профиля пучка заряженных частиц, а также зависимость положения центра тяжести пучка от профиля тока на токосъемнике за полный цикл.

Область применения: результаты проведенных исследований будут использованы в ФТИ ТПУ при проектировании системы автоматизации процесса испытаний фотоэлектрических элементов на радиационную стойкость.

В будущем планируется создание программы для определения положения центра тяжести пучка заряженных частиц.

Оглавление

Введение.....	3
1 Радиационная стойкость фотоэлектрических элементов.....	5
1.1 Фотоэлектрические элементы.....	5
1.2 Воздействие радиации на фотоэлементы	6
2 Испытания на радиационную стойкость	9
2.1 Структурная схема испытательной установки.....	9
2.2 Ускоритель частиц	10
2.3 Коллиматор	14
2.4 Методы диагностики параметров пучка	15
2.5 Электрометрические усилители	19
3 Предпроектный анализ системы автоматизации испытаний	20
3.1 Оценка толщины токосъемника	20
3.2 Зависимость тока от параметров токосъемника и пучка частиц.....	21
3.3 Определение общего тока пучка по его профилю.....	28
3.4 Зависимость положения центра тяжести пучка от тока на токосъемнике.	29
Заключение	36
Список использованных источников	37
Приложение А (рекомендуемое) Вычисление зависимости тока на токосъемнике от параметров токосъемника, коллиматора и пучка	37
Приложение Б (рекомендуемое) Вычисление зависимости положения центра тяжести пучка от профиля тока на токосъемнике	41
Приложение В (рекомендуемое) SWOT-анализ	42

Введение

В ближайшие годы Россия может оказаться в опасной технологической зависимости от иностранных производителей в области электронной компонентной базы и изделий полупроводниковой электроники при создании объектов аэрокосмической инженерии. Для предотвращения этого необходимо форсировать работы по созданию современной качественной электронной компонентной базы и изделий полупроводниковой электроники в радиационно-стойком исполнении. Оценка соответствия радиационной стойкости этих приборов является сложной технической задачей, что делает актуальной проблему проведения испытаний изделий полупроводниковой электроники на радиационную стойкость [1].

В физико-техническом институте Томского политехнического университета (ФТИ ТПУ) разрабатывается испытательная установка для проведения испытаний на радиационную стойкость фотоэлементов для космических аппаратов по заказу ПАО «Сатурн». Фотоэлементы входят в состав солнечных модулей и используются в космических аппаратах различного назначения. При эксплуатации в космическом пространстве солнечные батареи и, соответственно, фотоэлементы подвергаются воздействию радиации (радиационные пояса Земли, солнечное и космическое излучение), в результате чего происходит постепенное ухудшение их электрических характеристик [2].

Для проведения испытаний испытываемое изделие подвергается облучению пучком заряженных частиц. Диагностика пучка осуществляется для обеспечения требуемых параметров пучка на выходе ускорителя. Для этого будет использоваться измерительный преобразователь – токосъемник, который помещается поперек пучка и регистрирует ток, попадающий на него. С помощью токосъемника снимается усредненная картина распределения плотности тока [3].

Цель данной работы – проведение предпроектного анализа системы автоматизации процесса испытаний фотоэлектрических элементов на радиационную стойкость.

Для достижения цели работы поставлены следующие задачи:

- оценка толщины токосъемника;
- получение зависимости тока на токосъемнике от ширины токосъемника, размера коллиматора, профиля пучка заряженных частиц.
- получение зависимости положения центра тяжести пучка от профиля тока на токосъемнике за полный цикл.

В первом разделе рассматривается объект испытаний, фотоэлектрические элементы, а также воздействие на них радиации.

Во втором разделе описывается проектируемая испытательная система ФТИ ТПУ. Подробно рассматриваются ускоритель частиц, коллиматор, а также токосъемник, служащий для диагностики параметров пучка заряженных частиц. Выбран тип электронного усилителя системы автоматизации.

Третий раздел посвящен оценке толщины токосъемника, а также аналитическому вычислению зависимости тока на токосъемнике от ширины токосъемника, размера коллиматора, профиля пучка заряженных частиц, а также графическому представлению данной зависимости. Также рассматривается получение зависимости положения центра тяжести пучка от величины тока.

Четвертый раздел посвящен оценке объекта исследования с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения, а также технико-экономическому обоснованию ВКР.

В пятом разделе рассматриваются особенности организации рабочего места специалиста, производящего диагностику пучка заряженных частиц при проведении испытаний фотоэлектрических элементов на радиационную стойкость в лаборатории ФТИ ТПУ.

1 Радиационная стойкость фотоэлектрических элементов

1.1 Фотоэлектрические элементы

Преобразование солнечного света в электричество происходит в фотоэлементах, изготовленных из полупроводникового материала, например, кремния, которые под воздействием солнечного света вырабатывают электрический ток. Соединяя фотоэлементы в модули, а те, в свою очередь, друг с другом, можно строить крупные фотоэлектрические станции. КПД фотоэлектрических установок в настоящее время составляет около (10–14) %, однако отдельные фотоэлементы могут достигать эффективности 20 % и более [4].

Фотоэлемент представляет собой «сэндвич» из кремния – второго по распространенности на Земле вещества. Девяносто девять процентов современных солнечных элементов изготавливают из кремния (Si), а остальные построены на том же принципе, что и кремниевые солнечные элементы. На один слой кремния наносится определенное вещество, благодаря которому образуется избыток электронов. Получается отрицательно заряженный («N») слой. На другом слое создается недостаток электронов, он становится положительно заряженным («P»). Собранные вместе с проводниками, эти две поверхности образуют светочувствительный электронно-дырочный переход. Он называется полупроводником, так как, в отличие от электропровода, проводит ток только в одном направлении - от отрицательного к положительному. При воздействии солнца или другого интенсивного источника света возникает постоянный ток напряжением примерно в 0,5 В. Сила тока пропорциональна количеству фотонов. В любой фотоэлектрической системе напряжение почти постоянно, а ток пропорционален размеру фотоэлементов и интенсивности света [5].

В ФТИ ТПУ планируется проведение испытаний на радиационную стойкость фотоэлементов из кремния по заказу ПАО «Сатурн». Данные фотоэлементы входят в состав солнечных модулей и используются в

космических аппаратах различного назначения. Фотоэлементы являются источником питания практически для всех спутников на земной орбите, потому что они работают без поломок и почти не требуют технического обслуживания. Также среди преимуществ фотоэлементов стоит отметить то, что работают они на бесплатном топливе – солнечной энергии.

В зависимости от конкретных условий эксплуатации, ПАО «Сатурн» выпускаются различные конструктивно-технологические модификации фотоэлектронных элементов:

- с полированной поверхностью;
- с алюминиевым зеркалом на тыльной стороне;
- с встроенными шунтирующими диодами.

Электрические характеристики фотоэлементов и их значения для кремниевых фотоэлементов представлены в таблице 1 [2].

Таблица 1

Характеристика фотоэлемента	Значение
Плотность тока короткого замыкания, мА/см^2	41-46
Напряжение холостого хода, В	0,61-0,63
Ток в точке максимальной мощности, мА/см^2	44
Напряжение в точке максимальной мощности, В	0,52
Максимальная мощность, Вт/м^2	211
КПД, %	15,5

1.2 Воздействие радиации на фотоэлементы

Космическое излучение состоит на 90 % из протонов (т.е. ионов водорода), на 7 % из ядер гелия (альфа-частиц), менее 1 % тяжелые атомы и менее 1 % электроны. Звезды (включая Солнце) излучают не только видимый свет, но и рентгеновское и гамма-излучение. Во время вспышек на солнце радиация от солнца увеличивается в (1000-1000000) раз [6].

Серьезной проблемой космического приборостроения является то, что современные полупроводниковые технологии чувствительны к ионизирующей радиации. Под действием ионизирующего излучения полупроводники быстро деградируют. При эксплуатации в космическом пространстве солнечные модули и, соответственно, фотоэлектрические элементы подвергаются воздействию радиации (радиационные пояса Земли, солнечное и космическое излучение), в результате чего происходит постепенное ухудшение их электрических характеристик [5].

Действие ионизирующих излучений на материалы и изделия можно разделить на импульсное (протекающее очень короткое время) и непрерывное (длительное).

Воздействие непрерывной проникающей радиации приводит к постепенному необратимому изменению электрических параметров изделий электронной техники, вызываемому в основном смещениями атомов, т.е. нарушениями в структуре материала, а также незначительным изменением химического состава (активацией).

Импульсная радиация, действующая короткое время (10^{-7} – 10^{-3}) с, наряду с необратимым изменением электрических параметров изделий электронной техники аналогично воздействию непрерывной проникающей радиации, создает очень большую плотность ионизации в изделиях. Это, как правило, приводит к обратимому изменению электрических параметров изделий [7].

Таким образом, к фотоэлементам, применяемым в космическом приборостроении, предъявляются дополнительные требования. В частности, стабильность параметров по мере медленного набора суммарной дозы облучения и выживание после встречи с тяжелым заряженным частицами космической радиации.

Согласно ГОСТ 18298 [8] радиационная стойкость фотоэлемента – это его свойство выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах установленных норм во время и после воздействия ионизирующего излучения.

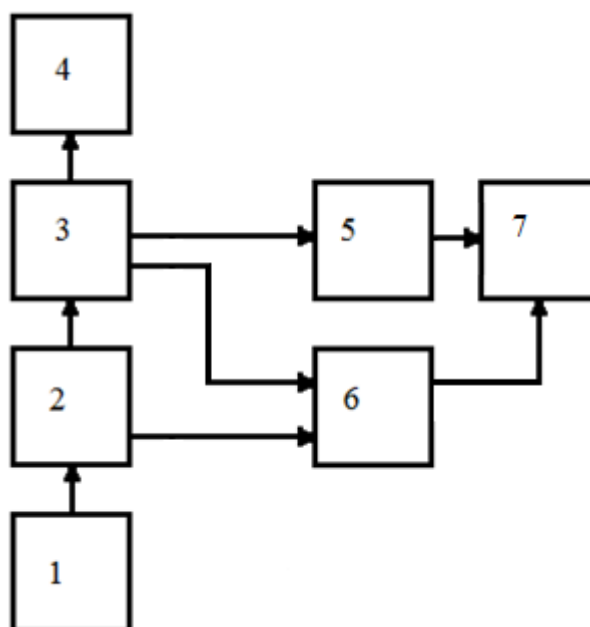
Все вышесказанное обуславливает необходимость проведения испытаний на стойкость к ионизирующей радиации фотоэлектрических элементов.

Стойкость фотоэлементов к воздействию радиации в наземных условиях в лаборатории ФТИ ТПУ будет исследоваться с помощью воздействия пучка протонов.

2 Испытания на радиационную стойкость

2.1 Структурная схема испытательной установки

Согласно действующему стандарту ГОСТ РВ 20.57.415 [9] испытания электронно-компонентной базы на радиационную стойкость преимущественным образом должны проводиться на моделирующих установках, поскольку считается, что в этом случае наиболее полно воспроизводятся реальные условия воздействия. Для проведения испытаний фотоэлементов на радиационную стойкость в ФТИ ТПУ проектируется специальная испытательная система. Ее структурная схема представлена на рисунке 1.



1 – ускоритель частиц; 2 – коллиматор; 3 – первичный измерительный преобразователь (токосъемник); 4 – мишень (испытываемое изделие); 5 – блок согласования; 6 – система позиционирования; 7 – регистрирующая аппаратура

Рисунок 1

В ФТИ ТПУ ускорителем частиц (1) является циклотрон Р-7М (У-120). Он создает поток протонов и дейтронов. Коллиматор (2) с помощью отверстия цилиндрической формы выделяет частицы с параллельными траекториями, создавая пучок частиц нужной поперечной формы. Токосъемник (3) движется

поперек пучка и аккумулирует заряд частиц, попадающих на него, позволяя контролировать плотность тока в пучке, облучающим мишень (4). Далее величина общего заряда с токосъемника стекает в токоприемник (обкладка конденсатора), согласованный с измерительным усилителем и аналого-цифровым преобразователем (5). Система позиционирования (6) снимает координаты токосъемников в окне коллиматора. В качестве регистрирующей аппаратуры (7) используется ПК.

2.2 Ускоритель частиц

Скорости частиц увеличиваются в процессе ускорения с помощью ускорителя, порой до значений, близких к скорости света [10].

Основная схема ускорения частиц предусматривает три стадии:

- формирование пучка и его инжекция;
- ускорение пучка;
- вывод пучка на мишень или осуществление соударения встречных пучков в самом ускорителе.

Формирование пучка и его инжекция: инжектор является исходным элементом всякого ускорителя. В инжекторе присутствует источник направленного потока частиц, обладающих низкой энергией – электронов, протонов, ионов, а также высоковольтные электроды и магниты, которые формируют пучок и выводят его из источника [3].

Источник формирует пучок частиц, который характеризуется средней начальной энергией, током пучка, его поперечными размерами и средней угловой расходимостью. Показателем качества инжектируемого пучка служит его эмиттанс, т.е. произведение радиуса пучка на его угловую расходимость. Чем меньше эмиттанс, тем выше качество конечного пучка частиц с высокой энергией. По аналогии с оптикой ток частиц, деленный на эмиттанс (что соответствует плотности частиц, деленной на угловую расходимость),

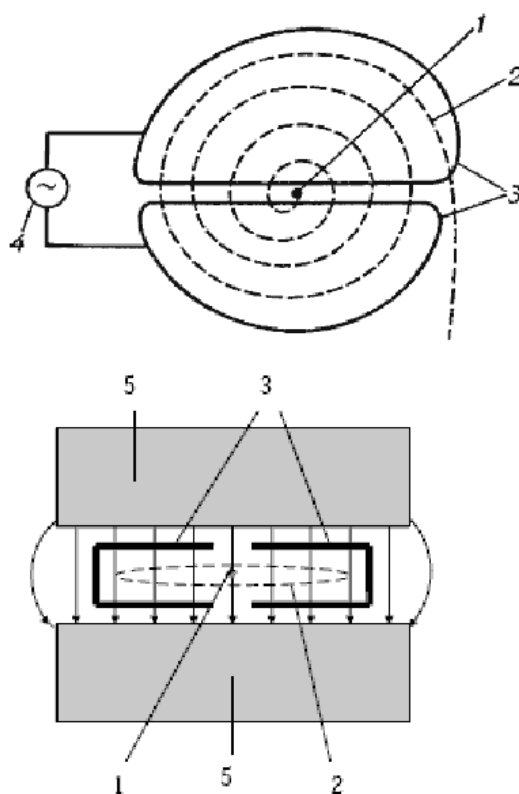
называют яркостью пучка. Во многих приложениях современных ускорителей требуется максимально возможная яркость пучков.

В камере ускорителя электрическое поле увеличивает скорость частиц и, как следствие, их энергию [3].

Циклотрон — циклический ускоритель нерелятивистских тяжёлых заряженных частиц (протонов, дейтронов, ионов), в котором частицы движутся в постоянном и однородном магнитном поле, а для их ускорения используется высокочастотное электрическое поле неизменной частоты [11].

Тяжелые заряженные частицы попадают в камеру из инжектора вблизи центра камеры и ускоряются переменным полем фиксированной частоты, приложенным к ускоряющим электродам (их два и они называются дуантами).

Схема устройства циклотрона (вид сверху и сбоку) показана на рисунке 2.



1 – источник тяжелых заряженных частиц; 2 – орбита ускоряемой частицы; 3 – ускоряющие электроды; 4 – генератор ускоряющего поля; 5 – электромагнит

Рисунок 2

Частицы движутся в постоянном магнитном поле, направленном перпендикулярно плоскости движения частиц, по раскручивающейся спирали. Радиус траектории частицы определяется формулой (2.1):

$$R = \frac{mvc}{ZeB} \gamma, \quad (2.1)$$

где m – масса частицы, кг;

v – скорость движения частицы, м/с;

c – скорость света, равная $2,9 \cdot 10^8$ м/с;

Ze – заряд частицы, Кл;

B – напряженность магнитного поля, А/м;

$\gamma = [1 - (v/c)^2]^{-1/2}$ – релятивистский фактор [12].

В циклотроне для нерелятивистской ($\gamma \approx 1$) частицы в постоянном и однородном магнитном поле радиус орбиты пропорционален скорости (1), а период обращения T , с, определяется формулой (2.2) и не зависит от энергии частицы.

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{ZeB} \gamma \approx \frac{2\pi m}{ZeB}. \quad (2.2)$$

где m – масса частицы, кг;

Ze – заряд частицы, Кл;

B – напряженность магнитного поля, А/м.

В зазоре между дуантами частицы ускоряются импульсным электрическим полем (внутри полых металлических дуантов электрического поля нет). В результате энергия и радиус орбиты возрастают. Повторяя ускорение электрическим полем на каждом обороте, энергию и радиус орбиты доводят до максимально допустимых значений. На последнем витке спирали включается отклоняющее электрическое поле, выводящее пучок наружу. Постоянство магнитного поля и частоты ускоряющего поля делают возможным непрерывный режим ускорения. Пока одни частицы двигаются по внешним виткам спирали, другие находятся в середине пути, а третьи только начинают движение [12].

Недостатком циклотрона является ограничение существенно нерелятивистскими энергиями частиц, так как даже не очень большие релятивистские поправки (отклонения γ от единицы) нарушают синхронность ускорения на разных витках и частицы с существенно возросшими энергиями уже не успевают оказаться в зазоре между дуантами в нужной для ускорения фазе электрического поля. В обычных циклотронах протоны можно ускорять до (20-25) МэВ.

Для ускорения тяжёлых частиц в режиме раскручивающейся спирали до энергий в десятки раз больших (вплоть до 1000 МэВ) используют модификацию циклотрона, называемую изохронным (релятивистским) циклотроном, а также фазотрон. В изохронных циклотронах релятивистские эффекты компенсируются радиальным возрастанием магнитного поля [12].

В качестве ускорителя частиц в ФТИ ТПУ используется циклотрон Р-7М (У-120). Технические характеристики циклотрона Р-7М представлены в таблице 2 [13].

Таблица 2

Характеристика циклотрона	Значение
Шаг регулировки изменения энергии, МэВ	0,5
Диаметр полюса, см	120
Конечный радиус ускорения, см	53
Магнитная индукция, кГс	9÷15
Диапазон изменения частоты, МГц	9÷17,2
Напряжение на дуанте, кВ	60
Число рабочих каналов	5
Система разводки пучка	веерная

Параметры ускоряемых циклотроном частиц представлены в таблице 3 [13].

Таблица 3

Тип ускоряемого иона	Энергия, МэВ	Ток пучка ионов, мкА
1H+1 (протоны)	4,5-11	50
2H+1 (дейтроны)	9-14	50
4He+2 (α - частицы)	4-28	50
3He	18-28	20

2.3 Коллиматор

Коллиматор (от *collimo*, искажение правильного лат. *collineo* – направляю по прямой линии) направляет движение частиц по параллельным траекториям, создавая протонный пучок нужной поперечной формы.

Коллиматоры для получения приблизительно параллельных пучков заряженных частиц представляют собой длинное отверстие с той или иной формой поперечного сечения, проделанное в поглощающем материале. Например, коллиматор гамма- или рентгеновских квантов может быть отверстием в свинцовом поглотителе; коллиматор тепловых нейтронов — отверстием в кадмиевом или борном поглотителе. На одном из концов коллиматора находится источник излучения. Простейшие коллиматоры такого рода могут применяться и в оптике. Когда необходимо получить плоский пучок, применяются щелевые коллиматоры, в этом случае квазипараллельными являются только проекции лучей на плоскость, перпендикулярную плоскости щели [10].

Принцип действия коллиматора представлен на рисунке 3.

Коллиматор позволяет формировать приемлемые параметры пучка. От его геометрических параметров зависит параллельность траекторий частиц. Чем уже, а также чем длиннее коллиматор, тем более параллельно относительно друг друга движутся заряженные частицы.

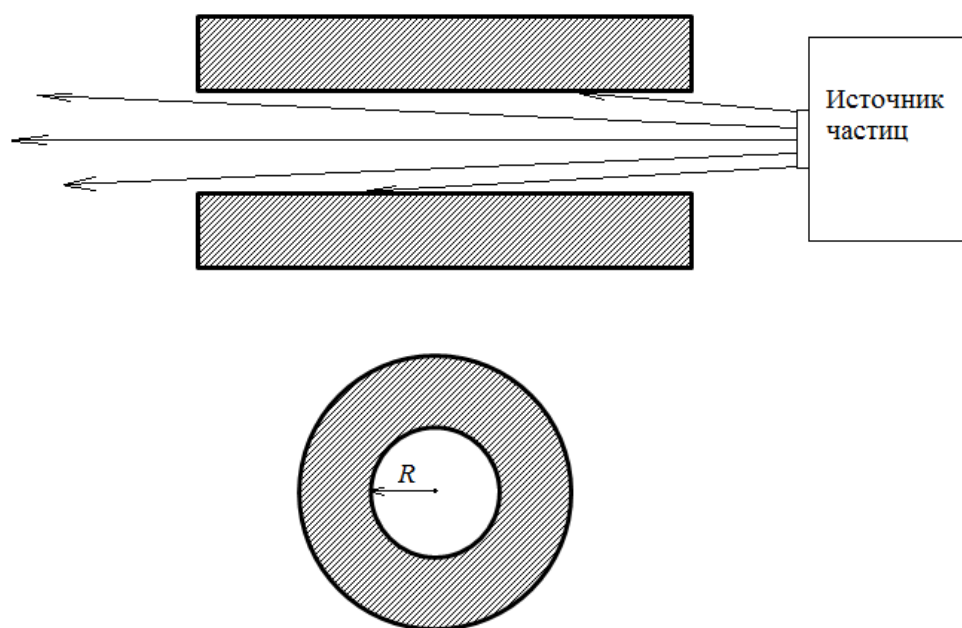


Рисунок 3

2.4 Методы диагностики параметров пучка

В настоящее время созданы и разрабатываются различные первичные измерительные преобразователи (ПИП) параметров и характеристик пучка заряженных частиц. Однако, не все полностью соответствуют тем требованиям, которые предъявляются к ПИП, предназначенным для работы в системах автоматического управления и измерения на ускорителях заряженных частиц. К числу основных требований относят следующие:

- минимальные воздействия, оказываемые преобразователем на параметры пучка (прозрачность преобразователя);
- возможность непрерывного получения информации об измеряемом параметре в широком диапазоне изменения его значения;
- высокая помехоустойчивость, эксплуатационная надежность, хорошая стабильность и повторяемость характеристик преобразователей;
- электрическая природа выходного сигнала ПИП и наименьшее количество преобразований измеряемого параметра до ввода в управляющую электронно-вычислительную машину;

- повышенная радиационная стойкость [12].

Для получения информации о параметрах пучка заряженных частиц используют преобразователи различного типа, отличающиеся друг от друга не только физическими принципами действия, но и степенью сложности и способами преобразования информации для ввода ее в управляющие системы. Согласно принятой на сегодня классификацией ПИП в зависимости от физического принципа, лежащего в основе преобразования, разделяют на следующие типы.

Полевые преобразователи, использующие взаимодействие электромагнитного поля, создаваемого пучком заряженных частиц, с измерительным устройством. К этому типу преобразователей относятся электростатические, магнитоиндукционные и резонаторные преобразователи, а также преобразователи, использующие эффект Холла.

Коллекторные преобразователи, принцип действия которых основан на поглощении всего пучка или его части на измерительных устройствах специальной конструкции, устанавливаемых на пути пучка заряженных частиц. К таким преобразователям относят цилиндр Фарадея, коллиматоры и диафрагмы, щелевые и ламельные преобразователи, зонды, мишени.

Ионизационные преобразователи, использующие явление ионизации пучком заряженных частиц либо остаточного газа в вакуумной камере ускорителя или в специальной камере, либо воздуха или инертных газов, если измерительное устройство устанавливается вне вакуумного объема ускорителя. К ним относят различные типы ионизационных камер.

Радиационные преобразователи, в которых для получения информации о параметрах пучка используют различные виды излучения: синхротронное, Вавилова – Черенкова, тормозное, переходное.

Эмиссионные преобразователи, в основе действия которых лежит явление вторичной электронной эмиссии.

Акустические преобразователи, принцип действия которых основан на регистрации механических напряжений в мишени, специальных фольгах или

проводах, возникающих при попадании на них пучка заряженных частиц.

Калориметрические преобразователи, которые используют нагревание пучком заряженных частиц специальных преобразователей или мишеней для получения информации о параметрах пучка.

Комбинированные преобразователи, которые включают в себя один или несколько вышеуказанных преобразователей с дополнительным воздействием на пучок, либо на преобразователь. К такому типу преобразователей относятся различного типа экраны и детекторы, магнитные и электростатические анализаторы, большинство измерителей эмиттанса пучка и средней энергии ускоренных частиц пучка [12].

Для диагностики параметров пучка заряженных частиц в испытательной установке будет использован зондовый метод. Сущность метода заключается в том, что поперек пучка перемещается зонд – металлический электрод (токоъемник) – небольших размеров и измеряется ток, попадающий на этот электрод. С помощью токоъемника снимается усредненная картина распределения плотности тока. Усреднение зависит от размеров токоъемника (пространственное разрешение) и от скорости сканирования (временное разрешение) [12].

Принцип работы токоъемника аналогичен устройству для определения полного электрического заряда и интенсивности пучка частиц, называемому цилиндр Фарадея. Устройство изготавливается из массивного проводника, может иметь любую форму, не обязательно цилиндрическую, важно лишь, чтобы толщины материала хватило для полного поглощения частиц пучка. Цилиндр устанавливается в вакууме. При измерениях на него выводится пучок частиц и измеряется стекающий заряд, с точностью до ошибок измерения равный заряду поглощённого пучка. Цилиндр Фарадея широко применяется на разных типах ускорителей, в основном на этапах запуска и наладки, а также для калибровки других устройств, поскольку относится к разрушающим методам диагностики. Токоъемник, применяемый при испытаниях на радиационную

стойкость, гораздо тоньше цилиндра Фарадея, однако принцип его работы такой же: измеряется заряд, стекающий с токосъемника в электрическую цепь.

Для уменьшения потерь необходимо применять токосъемники возможно меньших размеров и увеличивать скорость перемещения токосъемника.

Существуют различные варианты конструктивного оформления токосъемников. Токосъемник может иметь форму цилиндра, плоского диска, шара, эллипса и т. п. В качестве материала токосъемника используют вольфрам, молибден, бериллий. В любом случае проводник, по которому отводится ток от токосъемника, должен быть тщательно экранирован.

Для перемещения токосъемника применяют электромеханические сканирующие устройства, один из вариантов которых приведен на рисунке 4.

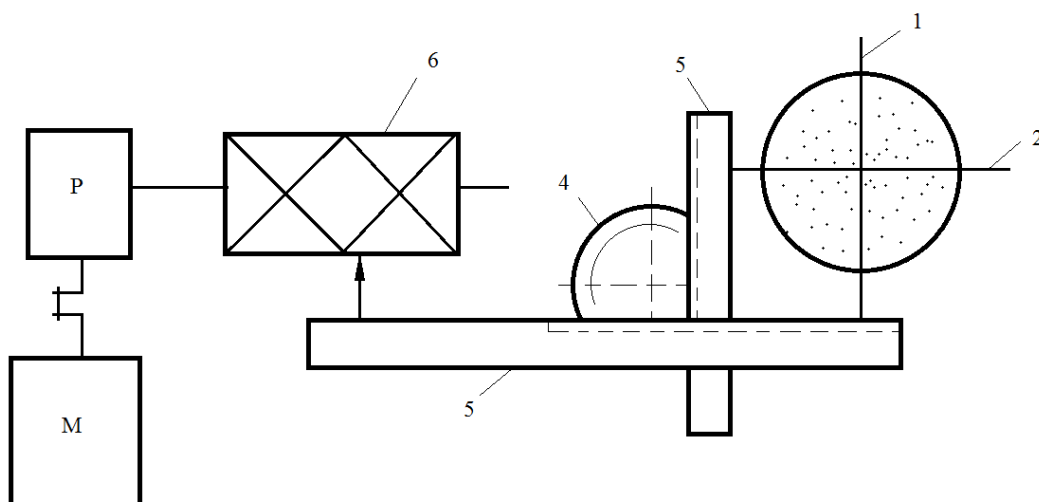


Рисунок 4

Мотор М через редуктор Р вращает кулачковый барабан (6) в накрест лежащих прорезях которого перемещается ползун, связанный с рейкой (5), совершающей вращательно-поступательное движение. Эта рейка с расположенной на ней токосъемной иглой (1) через качающуюся шестерню (4) передает возвратно-поступательное движение рейке (3) с укрепленной на ней токосъемной иглой (2). Электрические сигналы с электродов подаются на вход осциллографа.

Для уменьшения потерь частиц пучка на токосъемнике требуются большие скорости перемещения токосъемника [12].

2.5 Электрометрические усилители

Поскольку заряд, регистрируемый токосъемником крайне мал, возникает задача измерения малых токов. Для решения данной задачи используемая схема должна базироваться на электрометрическом операционном усилителе.

Схема включения усилителя представлена на рисунке 5.

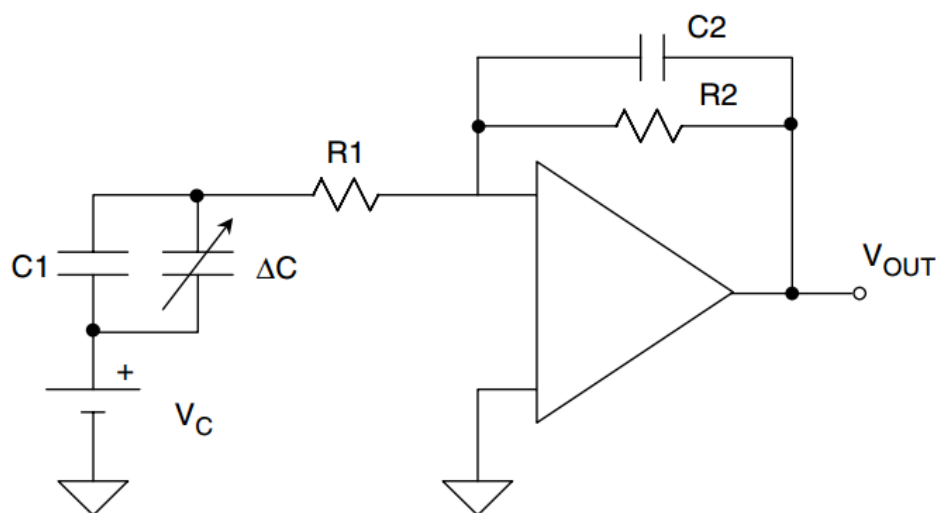


Рисунок 5

Электрометрические усилители предназначены для измерения напряжения и тока сверхмалых значений. Измерение напряжения производится в диапазоне (0-100) мВ, а измерение тока — (10^{-16} - 10^{-3}) А. Для электрометрических усилителей основным параметром является большое входное сопротивление. Они работают в области частот (0-10) Гц. Основной погрешностью этих усилителей является временной и температурный дрейфы нуля. Электрометрические усилители нашли большое применение для усиления малых сигналов и потенциалов различных датчиков. [14]

3 Предпроектный анализ системы автоматизации испытаний

3.1 Оценка толщины токосъемника

Для оценки толщины токосъемника необходимо учитывать ряд факторов. Так нужно знать особенности взаимодействия заряженных частиц и материала токосъемника – платины.

Тяжелые заряженные частицы взаимодействуют в основном с атомными электронами и поэтому мало отклоняются от направления своего первоначального движения. Вследствие этого, пробег тяжелой частицы измеряют расстоянием по прямой от источника частиц до точки их остановки [15].

Длина пробега частицы зависит от ее заряда, массы, начальной энергии, а также от свойств среды, в которой частица движется. Пробег увеличивается с возрастанием начальной энергии массивные частицы обладают меньшими скоростями, чем легкие. Медленно движущиеся частицы взаимодействуют с атомами более эффективно и быстрее растрачивают имеющуюся у них энергию

Заряженная частица проходит в веществе некоторое расстояние, прежде чем она потеряет всю свою кинетическую энергию. Численное значение проникающей способности излучения соответствует пробегу частицы, являющейся его составляющей [15].

Применительно к рассматриваемой ситуации, толщина токосъемника должна быть не меньше, чем пробег заряженных частиц (протонов и дейтронов) в платине. В ходе работы была рассчитана зависимость пробега протонов и дейтронов в платине от энергии частиц, которая графически представлена на рисунке 6.

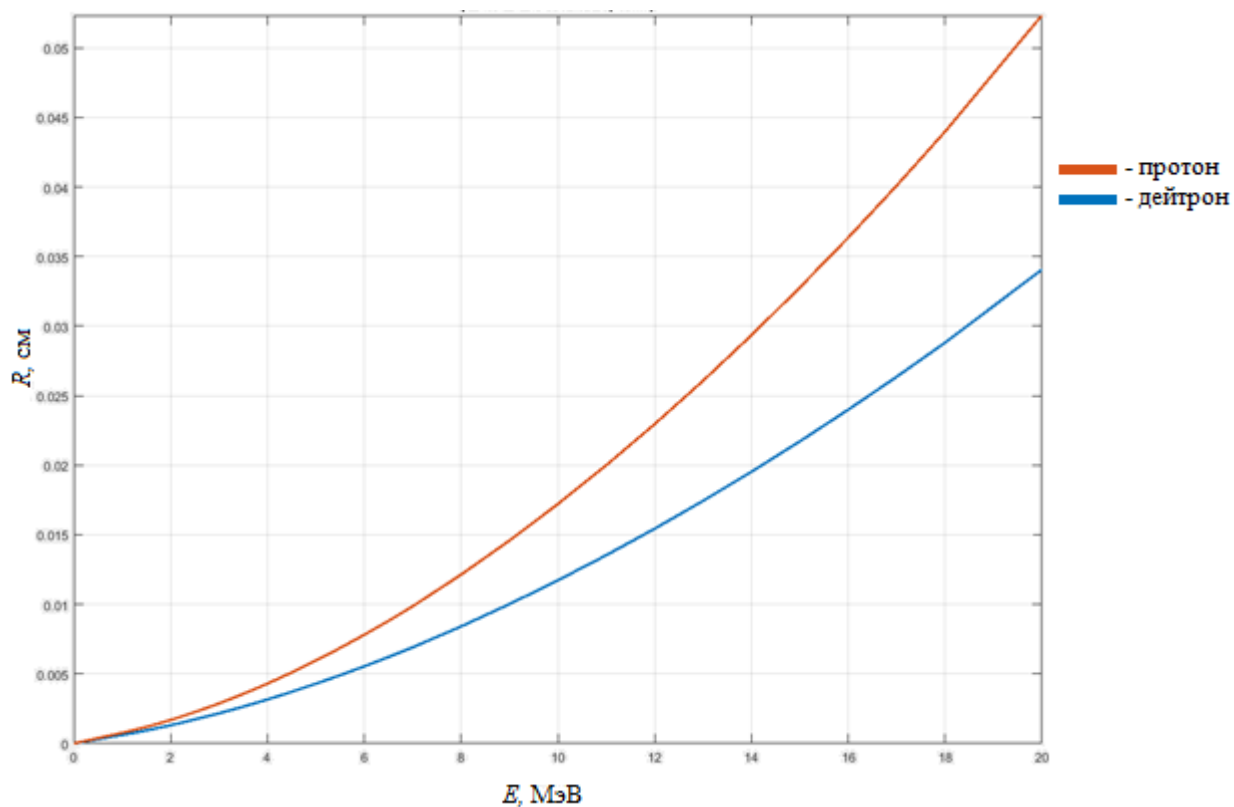


Рисунок 6

Энергия частиц, которые будут использоваться при испытаниях, составляет 13 МэВ. Таким образом, можно определить, что минимальная толщина токосъемника для частиц с данной энергией должна составлять 0,27 мм.

3.2 Зависимость тока от параметров токосъемника и пучка частиц

В ходе проведения испытаний на радиационную стойкость необходимо проводить постоянное наблюдение за пучком заряженных частиц для оценки и контроля его параметров, т. е. осуществлять мониторинг пучка. Мониторинг представляет собой определение профиля пучка заряженных частиц при помощи токосъемника, для того, чтобы:

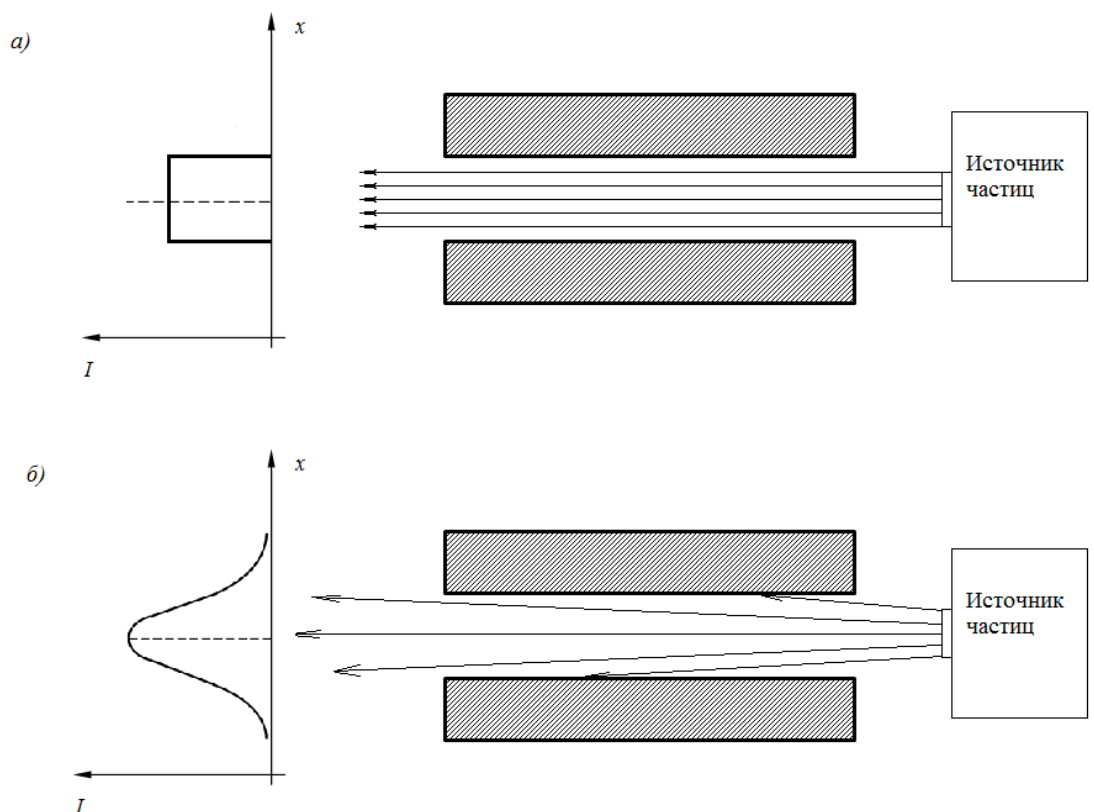
- определять общий ток пучка;
- определять местоположение центра тяжести.

При проведении процесса мониторинга, оператор анализирует кривые зависимости тока на токосъемнике от положения токосъемника. Важно

отметить, что на то, какой будет эта зависимость, влияют как параметры самого токосъемника, например, его ширина, так и параметры пучка частиц, такие как радиус пучка и вид распределения.

Радиус коллиматора R , мм, определяет радиус пучка частиц. При этом при прохождении потока заряженных частиц через коллиматор на мишени возможно два случая распределения этих частиц (рисунок 7).

Как показано в перечислении а) на рисунке 7, частицы в потоке летят по абсолютно параллельным траекториям, пучок частиц однородный, соответственно вид распределения частиц, наблюдаемый на мишени, является равномерным. Однако данный случай является идеальным и на практике нереализуем. В действительности, траектории частиц не параллельны, пучок неоднородный и плотность тока имеет профиль гауссиана (как показано в перечислении б) на рисунке 7).



- а) однородный пучок заряженных частиц;
- б) неоднородный пучок заряженных частиц.

Рисунок 7

Рассмотрим случай однородного пучка. В данном случае доля тока, приходящаяся на токосъемник, вычисляется по формуле (3.1):

$$I = I_B \frac{S}{\pi R^2}, \quad (3.1)$$

где I – ток в пластине токосъемника, мкА;

I_B – ток пучка, мкА;

S – площадь пластины, мм²;

R – радиус пучка, мм.

При этом площадь пластины зависит от положения токосъемника x в окне коллиматора (рисунок 8).

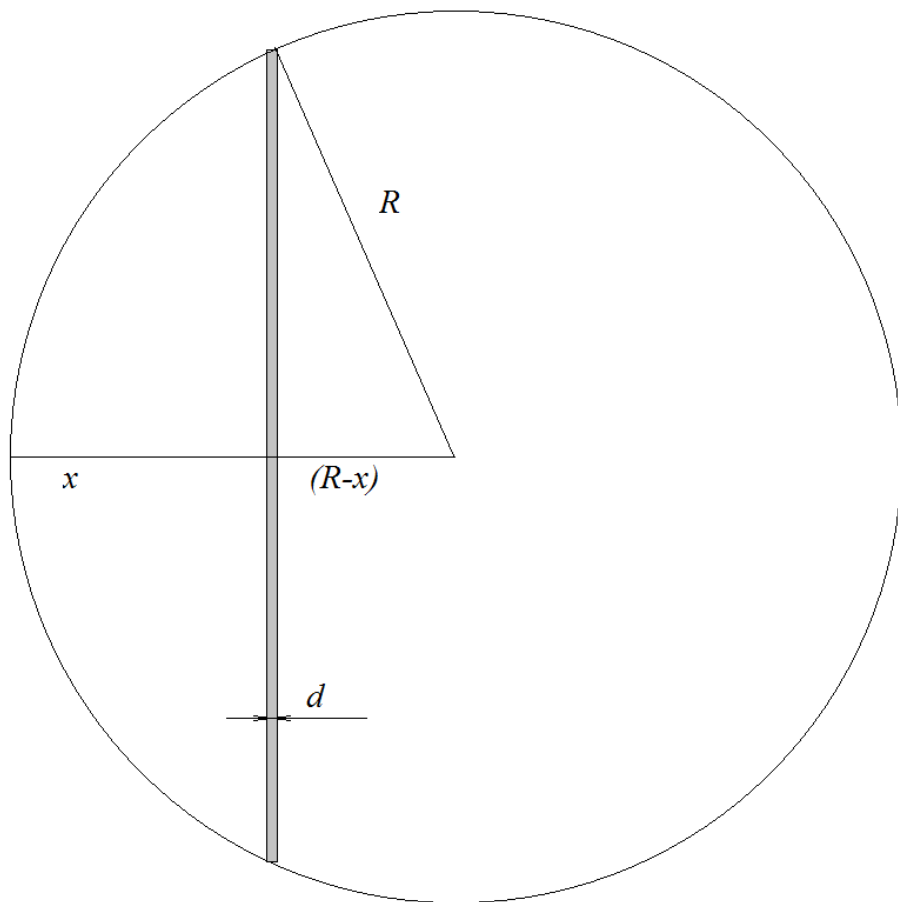


Рисунок 8

Поскольку ширина пластины токосъемника d пренебрежимо мала по сравнению с радиусом пучка R , при дальнейших вычислениях принимаем форму площади токосъемника в окне коллиматора как прямоугольник.

Применяя теорему Пифагора, вычисляем площадь S по формуле (3.2):

$$S = 2d\sqrt{R^2 - (R - x)^2} = 2d\sqrt{2xR - x^2}, \quad (3.2)$$

где x – координата положения токосъемника в окне коллиматора, мм;

d – ширина токосъемника, мм.

Тогда итоговая формула (3.3) для вычисления тока на токосъемнике:

$$I = I_B \frac{2d\sqrt{2xR - x^2}}{\pi R^2}, \quad (3.3)$$

где I – ток в пластине токосъемника, мкА;

I_B – ток пучка, мкА;

d – ширина токосъемника, мм;

x – координата положения токосъемника в окне коллиматора, мм;

R – радиус пучка, мм.

График зависимости силы тока в пластине I , мкА, в зависимости от положения токосъемника x , отн. ед., при различной ширине токосъемника d , мм, представлен на рисунке 9. Общий ток пучка I_B принят равным 50 мкА.

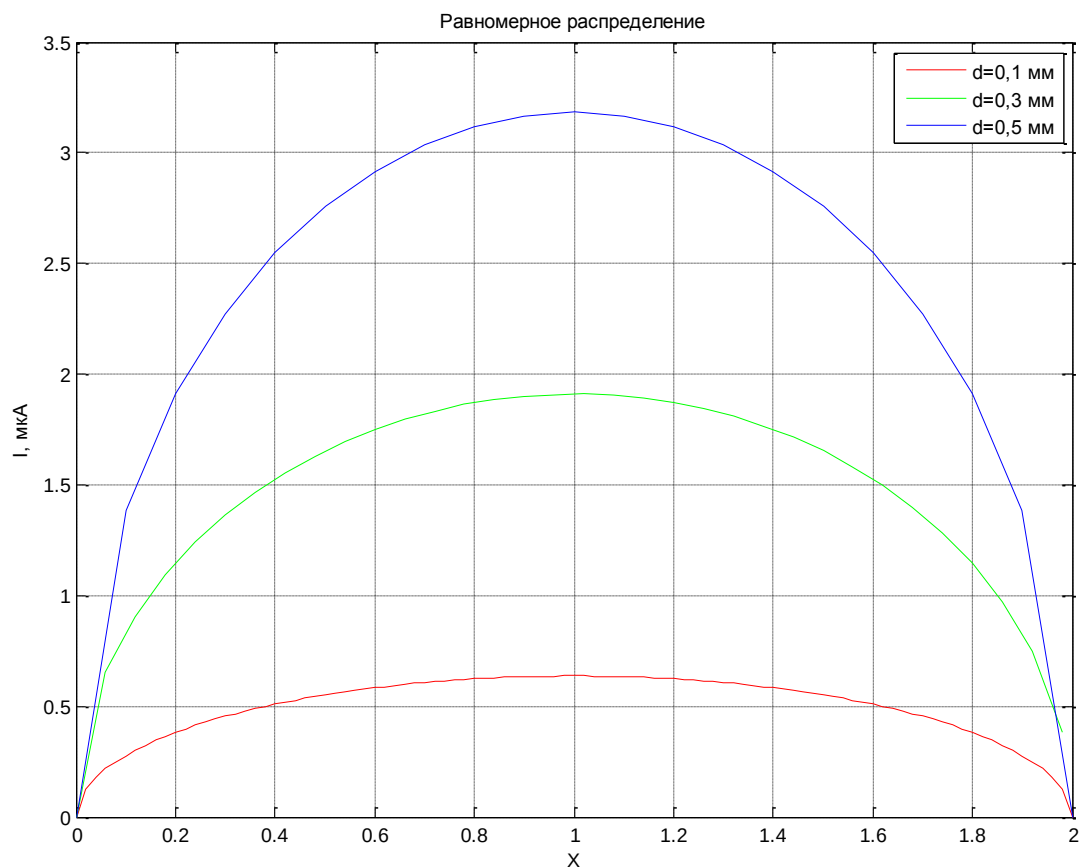


Рисунок 9

Построенный график наглядно показывает изменение площади пластины, а, следовательно, и тока на пластине, при изменении положения токосъемника в случае равномерного пучка частиц. Чем шире токосъемник, тем большая доля тока попадает на него, что необходимо учитывать при определении общего тока.

На рисунке 10 представлен график распределения плотности тока J , мкА/мм² вычисляемой по формуле (3.4):

$$J=I/S, \quad (3.4)$$

где I – ток на токосъемнике, мкА;

S – площадь токосъемника, мм².

Данная величина является постоянной, т.к. в случае однородного пучка плотность тока равномерна.

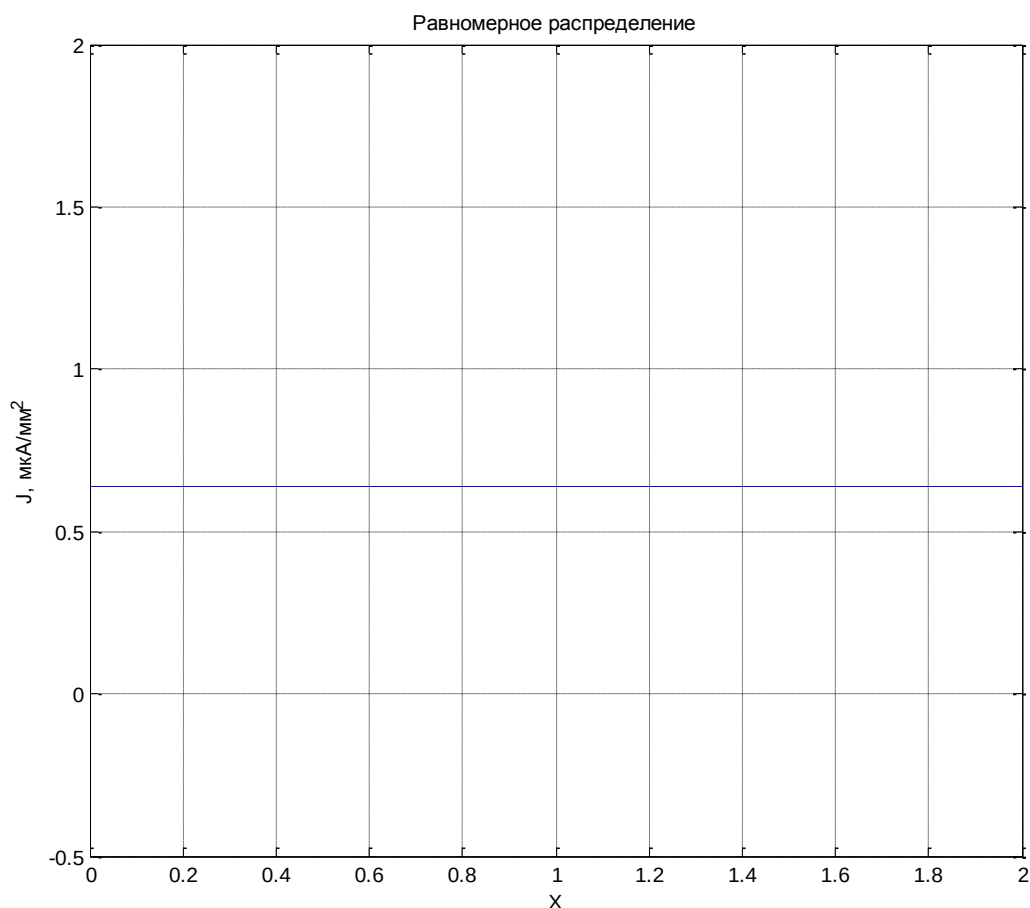


Рисунок 10

В результате проведенных исследований был изучен случай однородного пучка. Однако при реальных испытаниях пучок протонов и

дейтронов неоднороден. Его плотность имеет профиль гауссиана. Для того, чтобы математически описать изменение тока на токосъемнике, введем систему координат $(x; y)$ (приведена на рисунке 11).

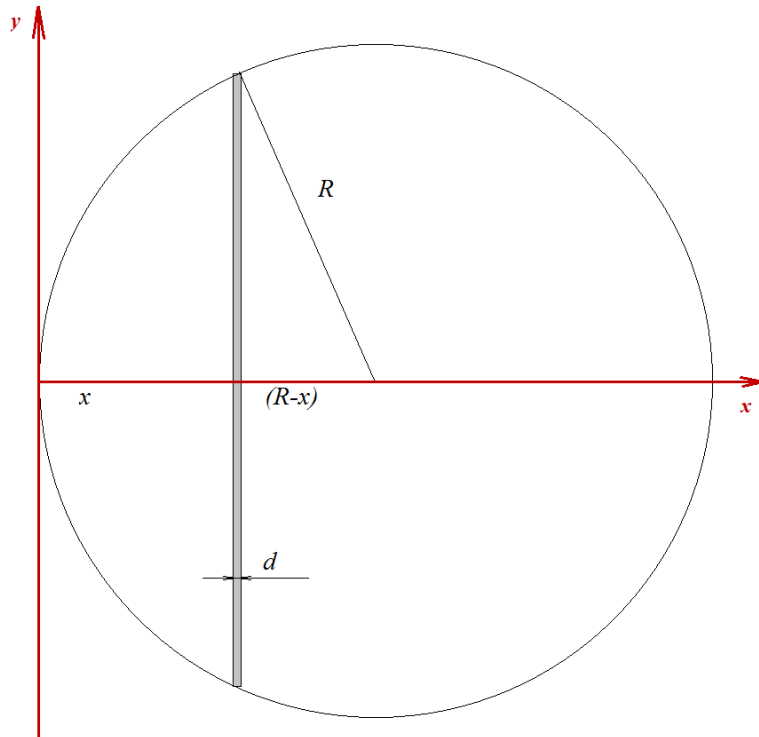


Рисунок 11

Распределение плотности тока в пучке частиц $f(x, y)$ при движении токосъемника вдоль оси OX , описывается формулой (3.5):

$$f(x, y) = I_{max} \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \right)^2 e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-\mu_y)^2}{\sigma_y^2} \right]}, \quad (3.5)$$

где I_{max} – максимальная плотность гауссиана, мкА/мм².

σ – ширина гауссиана на полувысоте, мм;

μ_x, μ_y – положение пика гауссиана относительно начала координат осей OX, OY соответственно, мм.

Принимая, что x и y некоррелированы, центр гауссиана находится в точке $(R; 0)$, а $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$, сила тока на пластине токосъемника I , мкА, вычисляется по формуле (3.6):

$$\begin{aligned}
I &= \int_{-y_B(x)}^{y_B(x)} \int_x^{x+d} f(x, y) dx dy = \\
&= I_{max} \int_{-y_B(x)}^{y_B(x)} \int_x^{x+d} \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \right)^2 e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(x-R)^2}{\sigma^2} + \frac{(y)^2}{\sigma^2} \right]} dx dy.
\end{aligned} \tag{3.6}$$

Введем замену переменных: $\tilde{x} = \frac{x}{R}, \tilde{y}_B = \frac{y_B}{R}, k = \frac{\sigma}{R}$. При этом $\tilde{x}$ будет изменяться от 0 до 2, а $\tilde{y}$ – от минус 1 до 1.

Связь $\tilde{y}_B$ и $\tilde{x}$ можно найти, используя формулу (3.7):

$$y_B = \sqrt{R^2 - (R - x)^2} = R\sqrt{1^2 - \left(1 - \frac{x}{R}\right)^2} \Rightarrow \tilde{y}_B = \sqrt{1 - (1 - \tilde{x})^2}.$$

Тогда:

$$\begin{aligned}
I &= \frac{I_{max}}{2\pi R^2 k^2} \int_{\tilde{x}}^{\tilde{x} + \frac{d}{R}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(\tilde{x}-1)^2}{k^2} \right]} d\tilde{x} R \int_{-\tilde{y}_B(\tilde{x})}^{\tilde{y}_B(\tilde{x})} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\tilde{y}^2}{k^2} \right]} d\tilde{y} R = \\
&= \frac{I_{max}}{2\pi k^2} \int_{\tilde{x}}^{\tilde{x} + \frac{d}{R}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(\tilde{x}-1)^2}{k^2} \right]} d\tilde{x} \int_{-\tilde{y}_B(\tilde{x})}^{\tilde{y}_B(\tilde{x})} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\tilde{y}^2}{k^2} \right]} d\tilde{y}.
\end{aligned}$$

Таким образом, ток на пластине токосъемника зависит от положения токосъемника x , отн. ед., коэффициента k , отн. ед., и отношению ширины токосъемника к радиусу коллиматора d/R .

График зависимости силы тока в пластине I , мкА, в зависимости от положения токосъемника x , отн. ед., при различной ширине токосъемника представлен на рисунке 12.

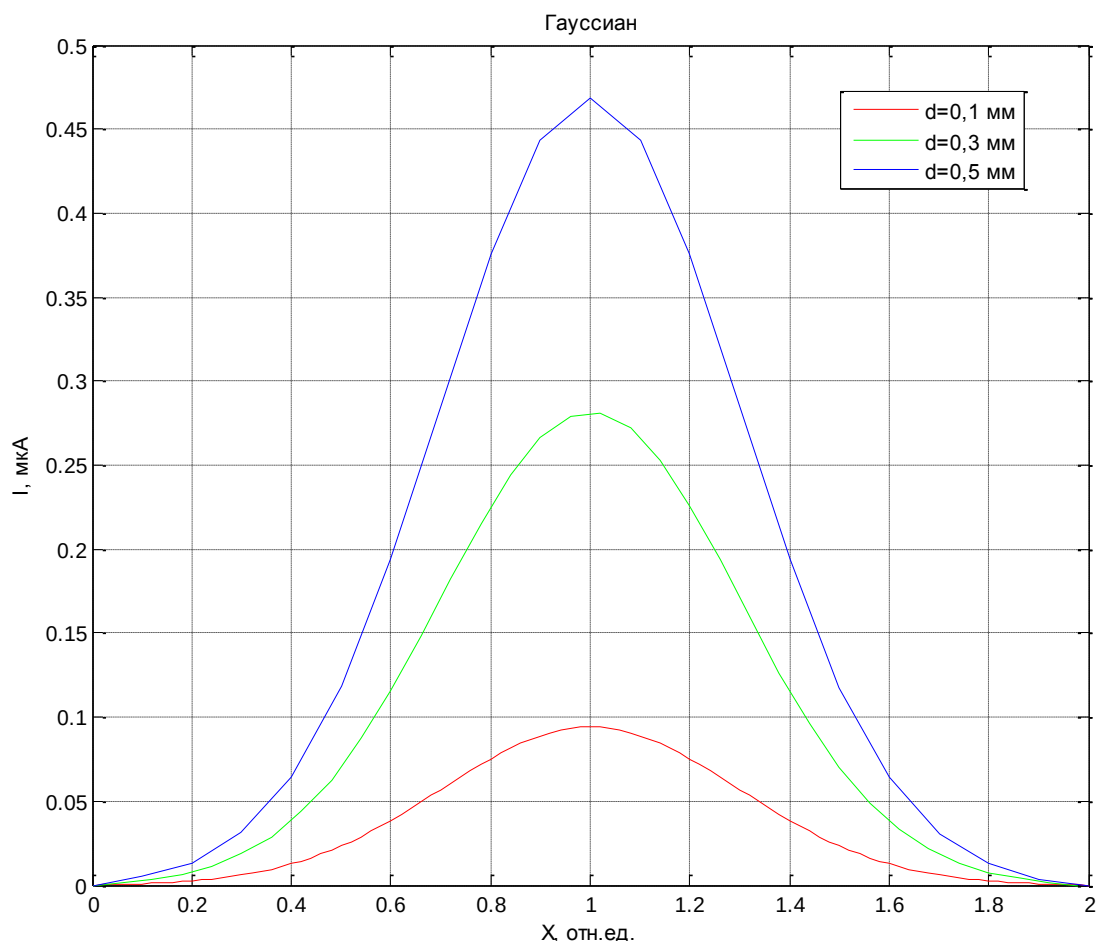


Рисунок 12

Для вычисления зависимости тока на токосъемнике от ширины токосъемника, размера коллиматора, профиля пучка заряженных частиц, была написана программа в программном пакете MATLAB, в соответствии с приложением А.

3.3 Определение общего тока пучка по его профилю

Как было отмечено ранее, одной из важнейших задач мониторинга пучка частиц является определение общего тока пучка по его профилю. Это необходимо для оценки величины дозы излучения, поглощенной облучаемой мишенью.

В случае реальных испытаний оператору поступает информация о величине тока на токосъемнике в зависимости от положения токосъемника $I(x)$.

Очевидно, что для вычисления общего тока I_B , мкА, необходимо проинтегрировать $I(x)$ с учетом коэффициента $l(x)$, рассчитываемого по формуле (3.8).

$$l(x) = \frac{\pi R^2}{S} = \frac{\pi R^2}{2d\sqrt{2xR - x^2}}. \quad (3.8)$$

Введение данного коэффициента позволяет получать корректные данные об общем токе пучка при изменении радиуса коллиматора R , мм, или ширины токосъемника d , мм.

Таким образом, конечная формула для вычисления общего тока пучка (3.9):

$$I_B = \int_0^{2R} l(x)I(x)dx. \quad (3.9)$$

3.4 Зависимость положения центра тяжести пучка от тока на токосъемнике

Определение положения центра тяжести пучка является важной задачей мониторинга пучка. Это производится для того, чтобы задавать положение центра тяжести пучка на мишени, а также стабилизировать его положение.

На рисунке 13 представлены графики изменения тока на токосъемнике при изменении положения максимума пучка Rx , отн. ед., вдоль оси коллиматора для $k=0,3$.

На графике рассмотрены 5 кривых изменения тока на токосъемнике, каждой из которых соответствует своё значение $Rx=\mu/R$ – максимума пучка. Координаты расположения максимума пучка R , отн. ед., x и максимума тока на токосъемнике x_{max} , отн. ед., представлены в таблице 4.

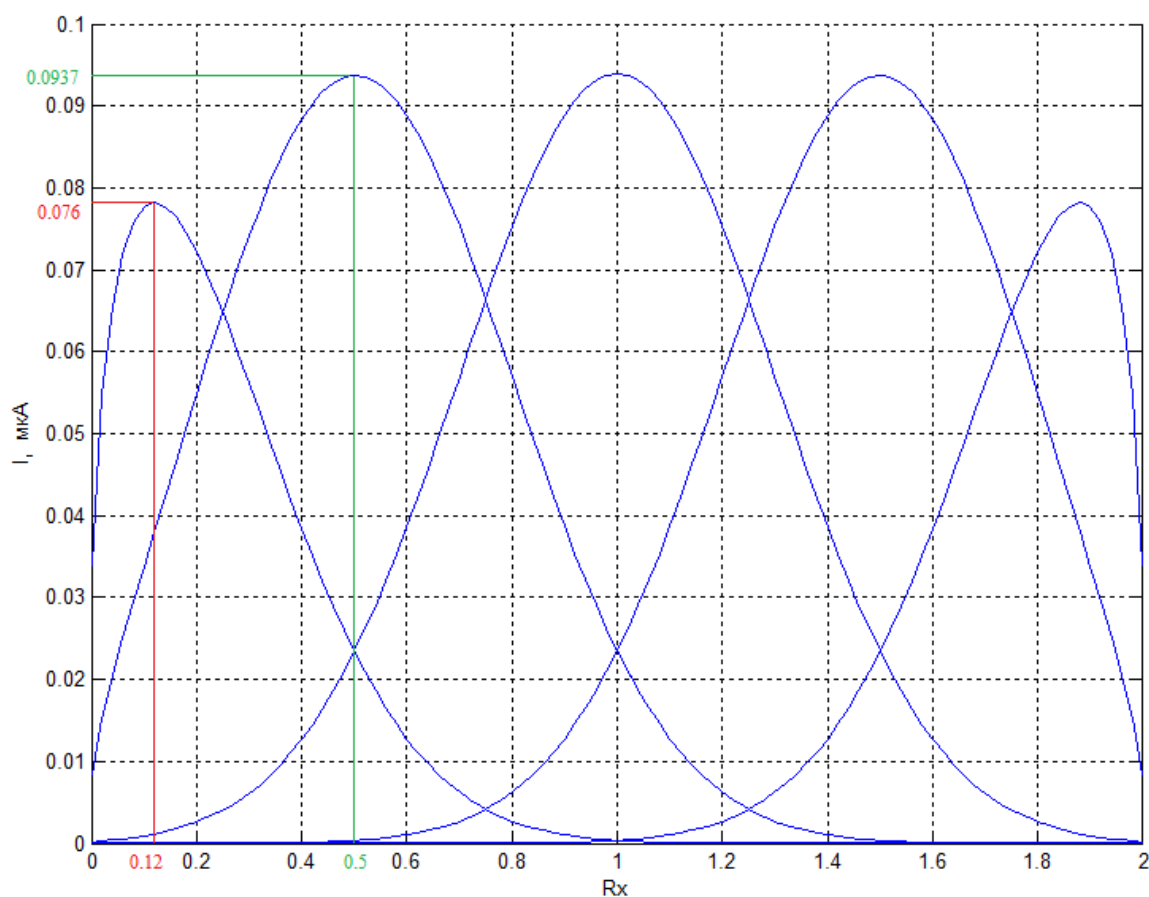
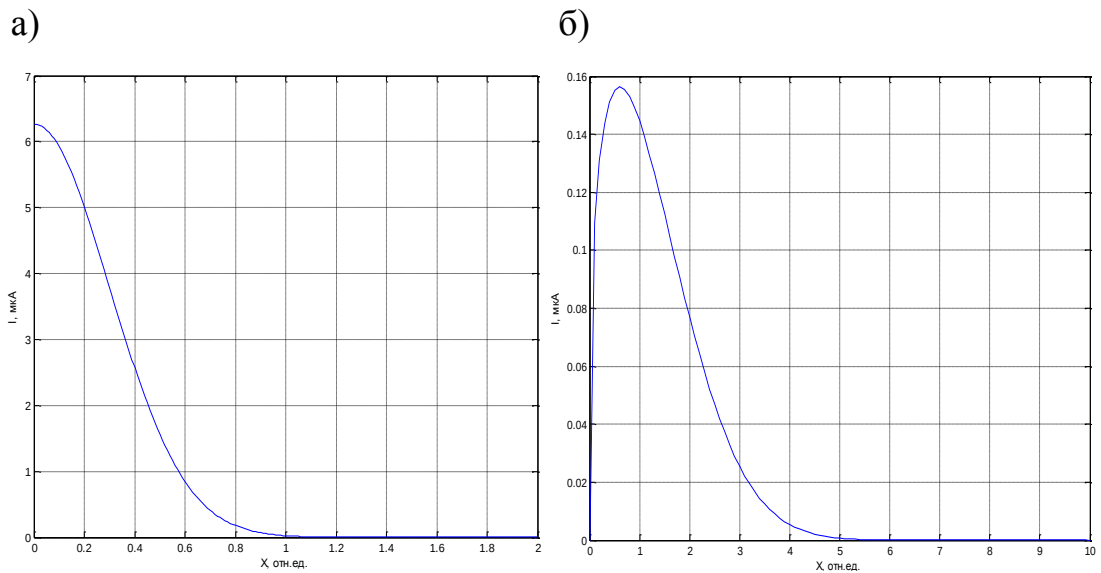


Рисунок 13

Таблица 4

R_x	x_{max}
0	0,12
0,5	0,5
1	1
1,5	1,5
2	1,88

На рисунке 14 представлены графики профиля пучка, центр которого совпадает с левой границей коллиматора, и тока на токосъемнике, соответствующим этому пучку.



а – график профиля пучка;

б – график тока на токосъемнике.

Рисунок 14

На данных графиках наилучшим образом видно смещение максимума тока относительно реального центра пучка. Координата максимума пучка $R_x=0$, отн. ед., тогда как координата максимума тока на токосъемнике $x_{max}=0,12$ отн. ед.

Проанализировав данные, можно сделать выводы о том, что если максимум пучка находится достаточно близко к краю коллиматора, максимум тока на токосъемнике не совпадает с ним. Аналогичная ситуация наблюдается и при увеличении количества рассматриваемых кривых. Этот факт проиллюстрирован рисунком 15, где представлен график зависимости координаты максимума тока на токосъемнике x_{max} , отн. ед., от координаты максимума пучка заряженных частиц R_x , отн. ед., при изменении положения максимума пучка вдоль оси коллиматора.

Таким образом, если за координаты центра тяжести пучка принимать координаты центра тяжести тока на токосъемнике, возникает методическая погрешность $\delta = x_{max} - R_x$, отн. ед.

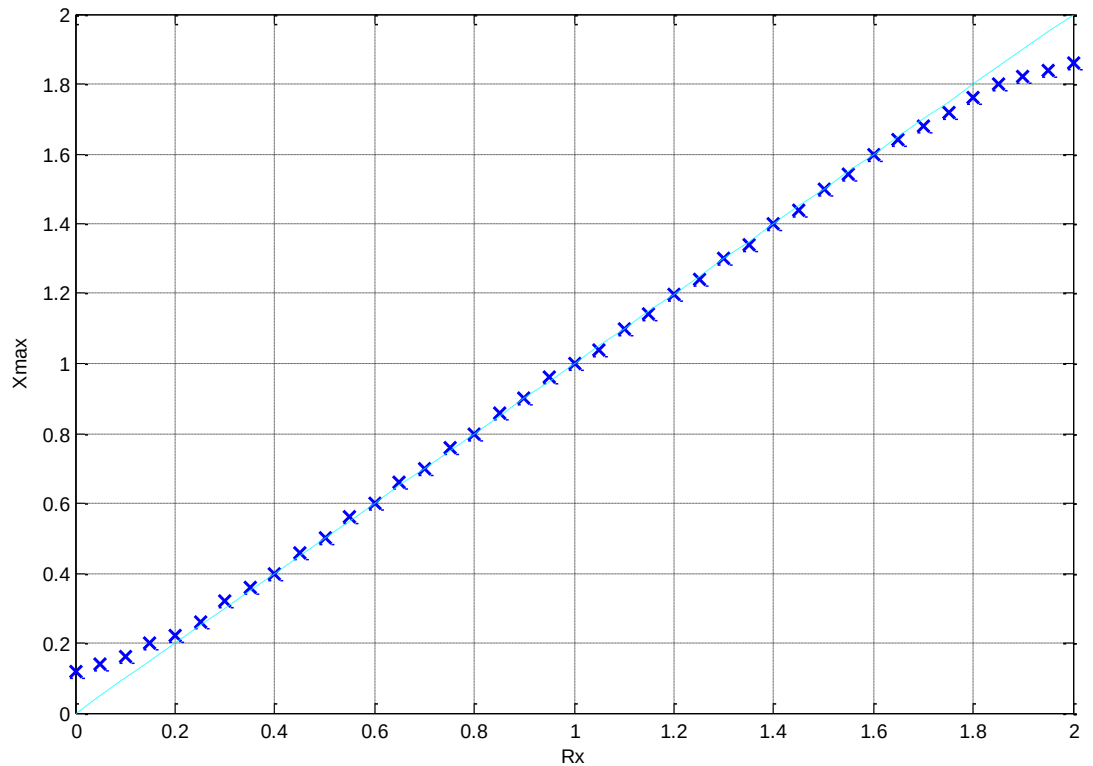


Рисунок 15

Таким образом, система формул (3.10) для определения координат центра тяжести пучка выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} x_{ц.т.} = x_{max}(1 + \delta); \\ y_{ц.т.} = y_{max}(1 + \delta), \end{cases} \quad (3.10)$$

где $x_{ц.т.}$ – координата центра тяжести пучка частиц по оси OX , отн.ед.;

x_{max} – координата максимума тока на токосъемнике по оси OX , отн.ед.;

δ – погрешность определения центра тяжести пучка, отн.ед.;

$y_{ц.т.}$ – координата центра тяжести пучка частиц по оси OY , отн.ед.;

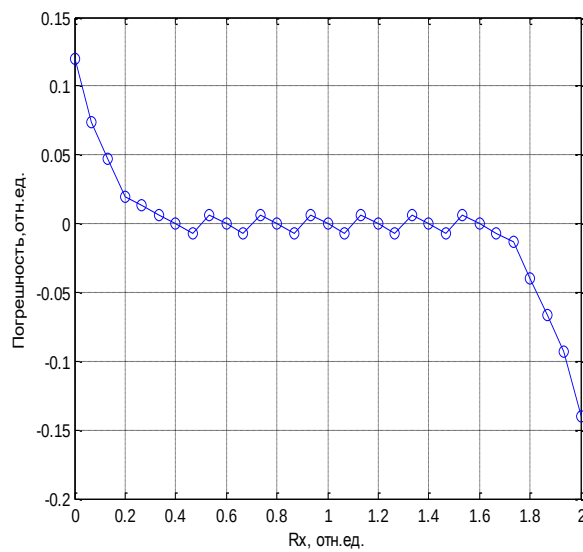
y_{max} – координата максимума тока на токосъемнике по оси OY , отн.ед..

Очевидно, что δ , отн. ед., зависит от положения токосъемника – она возрастает на периферии коллиматора. Необходимо определить, зависит ли она от ширины токосъемника.

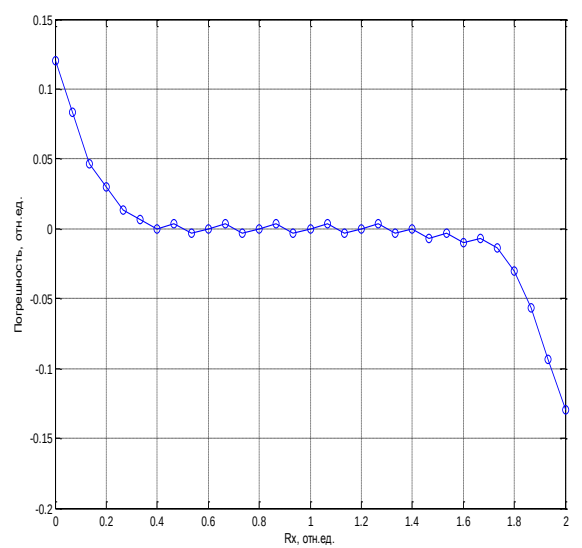
На рисунке 16 представлены графики погрешности определения центра тяжести пучка для $R=5$ мм, $k=0,3$, $d=0,1$ мм и $d=0,05$ мм. Из графиков следует, что при ширине токосъемника много меньше, чем радиус коллиматора ($d/R \ll 1$), погрешность определения центра тяжести пучка не зависит от

ширины токосъемника.

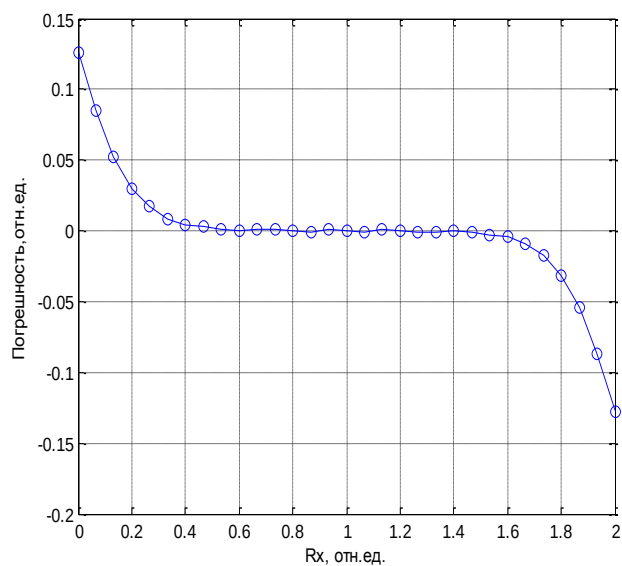
а)



б)



в)



а – $d=0,1$ мм;

б – $d=0,05$ мм;

в – $d=0,01$ мм.

Рисунок 16

Таким образом, принимаем, что функция погрешности определения центра тяжести пучка δ , отн. ед., зависит от положения максимума тока на токосъемнике x_{max} , отн. ед., и не зависит от отношения ширины токосъемника к радиусу коллиматора d/R , отн. ед.,.

Методом наименьших квадратов с помощью программной оболочки «Curve Fitting Toolbox» в программном пакете MATLAB подбираем наиболее оптимальную формулу для аппроксимации $\delta(x_{max})$, отн. ед.. Функция погрешности определения координаты центра тяжести пучка заряженных частиц, аппроксимированная дробно-рациональной функцией (числитель третьего порядка, знаменатель – пятого), представлена на рисунке 17.

Полученная в результате исследования формула (3.11) позволяет оценить значение погрешности $\delta(x_{max})$.

$$\delta(x_{max}) = \frac{-0,07x_{max}^3 + 0,21x_{max}^2 - 0,2x_{max} + 0,06}{x_{max}^5 + 0,86x_{max}^4 - 15x_{max}^3 + 18,96x_{max}^2 - 0,64x_{max} + 0,11}. \quad (3.11)$$

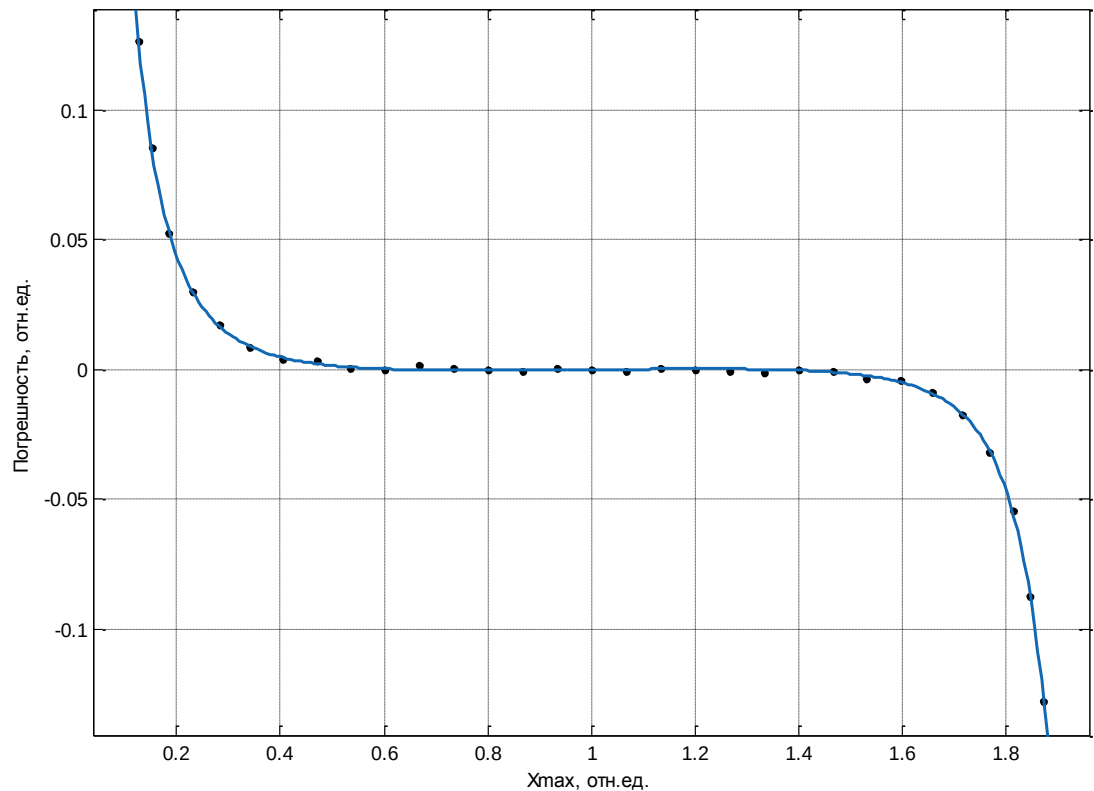


Рисунок 17

Система формул (3.12) представляет собой итоговые формулы для вычисления координат центра тяжести пучка.

$$\begin{cases} x_{ц.т.} = x_{max} \left(1 + \frac{-0,07x_{max}^3 + 0,21x_{max}^2 - 0,2x_{max} + 0,06}{x_{max}^5 + 0,86x_{max}^4 - 15x_{max}^3 + 18,96x_{max}^2 - 0,64x_{max} + 0,11} \right); \\ y_{ц.т.} = y_{max} \left(1 + \frac{-0,07y_{max}^3 + 0,21y_{max}^2 - 0,2y_{max} + 0,06}{y_{max}^5 + 0,86y_{max}^4 - 15y_{max}^3 + 18,96y_{max}^2 - 0,64y_{max} + 0,11} \right), \end{cases} \quad (3.12)$$

где $(x_{ц.т.}; y_{ц.т.})$ – координаты положения центра тяжести пучка, отн. ед.;

x_{max} – координата положения максимума тока по оси OX , отн.ед.;

y_{max} – координата положения максимума тока по оси OY , отн.ед..

Положение пучка, при котором его центр совпадает с центром окружности коллиматора, является наиболее благоприятным для испытаний. В этом положении координаты центра тяжести пучка (1;1). При этом, если центр пучка находится в ином положении, его необходимо сместить в точку (1;1) на расстояние c_x , отн. ед., по оси OX и на расстояние c_y , отн. ед., по оси OY , которые можно вычислить по формулам (3.13).

$$\begin{cases} c_x = 1 - x_{max}; \\ c_y = 1 - y_{max}. \end{cases} \quad (3.13)$$

Программа, созданная в программном пакете MATLAB, с помощью которой проводилось исследование приведена в приложении Б.

Заключение

В результате исследования получена оценка толщины токосъемника; получена зависимость тока на токосъемнике от ширины токосъемника, размера коллиматора, профиля пучка заряженных частиц, а также зависимость положения центра тяжести пучка от профиля тока на токосъемнике за полный цикл.

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы:

- изучена структурная схема испытательной системы ФТИ ТПУ;
- описаны все элементы схемы;
- исходя из особенностей проводимых испытаний, оценена толщина токосъемника;
- исходя из особенностей проводимых испытаний и испытательной установки, был выбран тип усилителя, оптимальный для решения поставленной задачи;
- выведены формулы, а также написаны программы в программном пакете MATLAB для вычисления: зависимости тока на токосъемнике от ширины токосъемника, размера коллиматора, профиля пучка заряженных частиц; зависимости положения центра тяжести пучка от профиля тока на токосъемнике за полный цикл.

Поставленные цель и задачи выпускной квалификационной работы выполнены в полном объеме.

Результаты проведенных исследований будут использованы в ФТИ ТПУ при проектировании системы автоматизации процесса испытаний фотоэлектрических элементов на радиационную стойкость.

Список использованных источников

- 1 Анисимов А. В., Герасимов В. Ф., Гонтарь В. В., Телец В. А. Роль и место имитационных испытаний в системе обеспечения стойкости аппаратуры вооружения и военной техники к действию ионизирующих излучений // ФГУ «12 ЦНИИ МО РФ» [Электронный ресурс]. - 2012.- Режим доступа: http://www.spels.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=13&Itemid=24 – Загл. с экрана.
- 2 ПАО «Сатурн». [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.saturn.kuban.ru/nuclear_fep.html, свободный. – Загл. с экрана.
- 3 Cyclotron produced radionuclides: principles and practice // International Atomic Energy Agency. – Vienna, 2008. – 230 p..
- 4 Солнечные батареи. [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://solarmir.ru/avtonomnaia-sistema-elektrosnabzheniia/fotoelektricheskie-moduli>, свободный. – Загл. с экрана.
- 5 Альтернативные источники энергии. [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://www.energy-bio.ru/pfoto3.htm>, свободный. – Загл. с экрана.
- 6 Микроэлектроника для космоса и военных. [Электронный ресурс].- Режим доступа: <https://habrahabr.ru/post/156049>, свободный. – Загл. с экрана.
- 7 Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / В. М. Кулаков, Е. А. Ладыгин, В. И. Шаховцов и др. - М: Сов. радио, 1980. - 224 с.
- 8 ГОСТ 18298-79 Стойкость аппаратуры, комплектующих элементов и материалов радиационная. Термины и определения. [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://www.gosthelp.ru/gost/gost4457.html>, свободный. – Загл. с экрана.
- 9 ГОСТ РВ 20.57.415-98 Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Специальные воздействия. - М.: Госстандарт России, 2004. - 48 с.
- 10 Энциклопедия Кольера. [Электронный ресурс].- Режим доступа: http://dic.academic.ru/contents.nsf/enc_colier/, свободный. – Загл. с экрана.

11 Частицы и атомные ядра / Б. С. Ишханов, И. М. Капитонов, Н. П. Юдин – М.: Издательство ЛКИ, 2007. - 584 с.

12 Москалев В.А., Сергеев Г.И., Шестаков В.Г. Измерение параметров пучков заряженных частиц. М.: Атомиздат, 1980 – 160 с.

13 Лаборатория получения радиоактивных веществ. [Электронный ресурс] .- Режим доступа: <http://portal.tpu.ru/departments/laboratory/lprv/history>, свободный. – Загл. с экрана.

14 Электрометрические и измерительные усилители. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.lektsia.com/1x5659.html>, свободный. – Загл. с экрана.

15 Взаимодействие тяжелых заряженных частиц с веществом. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/partmat/pm01.htm>, свободный. – Загл. с экрана.

16 ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация [Электронный ресурс]. – URL: <http://vsegost.com/Catalog/41/41131.shtml> - Загл. с экрана.

17 СП 52.13330.2011 Свод правил. Естественное и искусственное освещение [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200084092> - Загл. с экрана.

18 СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки [Электронный ресурс]. – URL: <http://base.garant.ru/4174553/> - Загл. с экрана.

19 СанПиН 2.2.2/2.4.1340 – 03. Санитарно – эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы [Электронный ресурс]. – URL: http://www.rosteplo.ru/Npb_files/npb_shablon.php?id=707 - Загл. с экрана.

20 СанПиН 2.2.4.548 – 96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ntm.ru/control/37/6956> - Загл. с экрана.

21 ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/21681/> - Загл. с экрана.

22 СанПиН 2.04.03-95 Нормы проектирования. Канализация. Наружные сети и сооружения [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.vashdom.ru/snip/2.04.03-85/> - Загл. с экрана.

23 НПБ 105-03. Нормы пожарной безопасности. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. [Электронный ресурс]. – URL: <http://ockc.ru/wp-content/standart/105-03.pdf> - Загл. с экрана.

24 Технический регламент «О требованиях пожарной безопасности» [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> - Загл. с экрана.

25 Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ. [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/trudovoj-kodeks-rf-tk-rf> - Загл. с экрана.

Приложение А

(рекомендуемое)

Вычисление зависимости тока на токосъемнике от параметров токосъемника, коллиматора и пучка

```
function [I,xm]=integral(Im,k,d,R)
a=d/R;
ik=2*R/d;
for i=1:1:ik+1
    x=0+(i-1)*a;
    xm(i)=x;
    if x<=0
        y=0;
        z(i)=0;
    elseif x>=2
        y=0;
        z(i)=0;
    else
        yv=sqrt(1-(1-(x+a/2)).^2);
        F=@(x,y)1/(2*pi*pi*k*k)*exp(-0.5*(1/(k*k))*((x-1).^2+y.^2));
        z(i)= Im*dblquad(F,x-a/2,x+a/2,-yv,yv);
    end
end
plot(xm,z);
grid;
xlabel('X, отн.ед. ');
ylabel('I, мкА');
end
```


Приложение Б

(рекомендуемое)

Вычисление зависимости положения центра тяжести пучка от профиля тока на токосъемнике

```
function [z,xm]=integral (Im,k,d,R)
a=d/R;
ik=2*R/d;
jk=30;
for j=1:1:jk+1
    Rx(j)=(j-1)*2/jk;
    for i=1:1:ik+1
        x=(i-1)*a;
        xm(i)=x;
        if x<=0
            y=0;
            z(i)=0;
        elseif x>=2
            y=0;
            z(i)=0;
        else
            yv=sqrt(1-(1-(x+a/2)).^2);
            F=@(x,y)1/(2*pi*k*k)*exp(-0.5*(1/(k*k))*((x-
Rx(j)).^2+y.^2));
            z(i)= Im*dblquad(F,x-a/2,x+a/2,-yv,yv);
        end
    end
    xmax(j)=0;
    zmax(j)=0;
    for i=2:1:ik+1
        if(z(i)>z(i-1))
            zmax(j)=z(i);
            xmax(j)=xm(i);
        end
    end
end
end
grid ;
plot(Rx,xmax-Rx,'-o');
xlabel('Rx, отн.ед. ');
ylabel('Погрешность, отн.ед. ');
end
```

Приложение В

(рекомендуемое)

SWOT-анализ

Таблица В.1

Сильные стороны	Слабые стороны
С1. Экономичность и энергоэффективность технологии.	Сл1. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство промышленных установок под ключ.
С2. Экологичность метода. При работе на установке все выделяемые вещества находятся, в пределах нормы, не происходит загрязнения окружающей среды.	Сл2. Сложное финансовое положение.
С3. Наличие необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца.	Сл3. Отсутствие собственной сырьевой базы.
С4. Квалифицированный персонал.	
Возможности	Угрозы
В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ	У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства.
В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт.	У2. Несвоевременное финансовое обеспечение.

Таблица В.2

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Экономичность и энергоэффективность технологии С2. Экологичность технологии. С3. Наличие необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца. С4. Квалифицированный персонал.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство промышленных установок под ключ. Сл2. Сложное финансовое положение. Сл3. Отсутствие собственной сырьевой базы.
Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2. Появление	В1С1С2С3С4, В2С1С2С3. Из данной комбинации видим, что вышеперечисленные сильные стороны	В1Сл2, В2Сл1Сл2. Анализ показывает, что такие возможности как В1 и В2 положительно влияют на слабые стороны проекта, т.к

дополнительного спроса на новый продукт.	благоприятно влияют на возможность появления дополнительного спроса на проведение испытаний фотоэлементов на радиационную стойкость, используя инновационную инфраструктуру, лаборатории ФТИ ТПУ	появление дополнительного спрос, а также инновационная инфраструктура ТПУ могут существенно улучшить сложное финансовое положение и повысить интерес компаний, оказывающих инжиниринговые услуги
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства У2. Несвоевременное финансовое обеспечение	У1С1С3, У2С1С3. Проведя анализ сильных сторон и угроз, видно, что вышеуказанные сильные стороны проекта могут существенно понизить процент угроз исследования	-

Вид работ	Исполнители	T _{к.}	Продолжительность выполнения работ											
		кал. дн.	Февраль			Март			Апрель			Май		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Составление и утверждение технического задания	Руководитель	4												
Изучение проблемы и подбор литературы	Дипломник	4												
Изучение литературы и выбор методов решения проблемы	Дипломник	12												
Календарное планирование работ по теме	Дипломник	3												
Проведение теоретических расчетов и обоснований	Руководитель, дипломник	14												
Анализ, обработка полученных результатов	Руководитель, дипломник	14												
Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, дипломник	4												
Оформление пояснительной записки	Дипломник	19												
Подготовка к защите темы	Дипломник	13												

Вид работ	Исполнители	T _{к.}	Продолжительность выполнения работ											
		кал. дн.	Февраль			Март			Апрель			Май		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Составление и утверждение технического задания	Руководитель	4												
Изучение проблемы и подбор литературы	Дипломник	4												
Изучение литературы и выбор методов решения проблемы	Дипломник	12												
Календарное планирование работ по теме	Дипломник	3												
Проведение теоретических расчетов и обоснований	Руководитель, дипломник	14												
Анализ, обработка полученных результатов	Руководитель, дипломник	14												
Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, дипломник	4												
Оформление пояснительной записки	Дипломник	19												
Подготовка к защите темы	Дипломник	13												