

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 99 с., 29 рис., 16 табл., 24 источников, 1 прил.

Ключевые слова: Безжелезный малогабаритный импульсный бетатрон, индукционный датчик, магнитное поле электромагнита.

Целью исследовательской работы является измерение основных характеристик электромагнита безжелезного импульсного бетатрона и сравнение расчетных характеристик распределения магнитного поля с нашими экспериментальными данными.

В результате работы создан индукционный датчик. С его помощью можно измерять основные параметры электромагнита. Экспериментальным образом были найдены показатель спада магнитного поля, равновесная орбита бетатрона БИМ–117М и рассчитана азимутальная асимметрия.

## Оглавление

Введение.....	4
1. Теоретический анализ.....	6
1.1 Описание принципов работы бетатронной установки.....	6
1.2 Фокусировка движения электрона в магнитном поле бетатрона.....	9
1.3 Возмущения структуры магнитного поля и их влияние на динамику пучка электронов в бетатроне.....	13
1.4 Электромагнит безжелезных бетатронов типа БИМ.....	14
2. Экспериментальная часть.....	18
2.1 Индукционная методика измерения магнитной индукции .....	18
2.2 Описание экспериментальной установки .....	20
2.2.1 Система импульсного питания .....	22
2.2.2 Электромагнит.....	24
2.2.3 Измерительная система .....	26
2.2.3.1 Индукционные датчики и устройство позиционирования .....	26
2.2.3.2 Интеграторы .....	29
2.2.4 Калибровка индукционных датчиков .....	31
2.2.5 Учет погрешностей измерений.....	33
2.3 Результаты измерений .....	35
2.3.1 Измерения магнитной индукции по радиусу с помощью одной катушки .....	35
2.3.2 Измерение показателя спада с помощью дифференциальных датчиков .	42
2.3.3 Измерение азимутальной асимметрии магнитного поля.....	43
2.3.4 Измерение локального возмущения магнитной индукции бетатрона устройством ввода инжектора .....	46
3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.1 Предпроектный анализ .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.2 FAST– анализ.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.3 Расчет сметы затрат на выполнение НИР.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>

4. Социальная ответственность.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.2.1 Требования к ПЭВМ и организация работы .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.2.2 Условия безопасной работы.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.3 Радиационная безопасность .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.3.1 Требования безопасности перед началом работы ..	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.3.2 Требования безопасности по окончании работы.	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.3.3 Радиационный контроль.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.4 Электробезопасность .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.5 Пожарная и взрывная безопасность.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Заключение .....	48
Список литературы .....	52
Приложение А. Measuring betatron's magnetic field inhomogeneity.....	55

## **Введение**

Импульсная теньевая рентгенография является одним из основных средств получения информации о динамике тел во взрывных экспериментах. Качество получаемой информации определяется характеристиками источника излучения и, в первую очередь его интенсивностью. Источниками излучения для импульсной рентгенографии являются специальные рентгеновские аппараты, в которых предварительно ускоренные электроны тормозятся в мишени, генерируя тормозное излучение. Интенсивность такого источника пропорциональна числу электронов попадающих на мишень и быстро растет с ростом энергии электронов. Наиболее мощные источники создаются на базе ускорителей электронов, в которых они ускоряются до десятков МэВ.

Во ВНИИЭФ для этой цели созданы, используются и совершенствуются бетатронные установки класса безжелезных-импульсных- малогабаритных (БИМ) [1,2]. Это компактные циклические ускорители, в которых пучок электронов, сформированный в специальном устройстве – инжекторе, удерживается на стационарной орбите за счет специального пространственного распределения магнитного поля и ускоряется вихревым электрическим полем, возникающим при изменении магнитного потока через площадь, охватываемую орбитой. Для формирования необходимого пространственного распределения магнитного поля и обеспечения высокого темпа ускорения используются многозаходные безжелезные электромагниты [3]. Такая конструкция электромагнита позволяет генерировать бетатронное

магнитное поле с хорошей азимутальной симметрией. Однако в магнитном поле могут возникать неоднородности различной природы, которые могут пагубно влиять на динамику пучка в процессе ускорения таких как эффект близости токов, скин-эффект и другие, которые могут приводить к изменению геометрии магнитного поля во времени [4]. В частности, для получения мощного источника излучения, в бетатронах БИМ используется мегавольтная инжекция, при которой инжектируемый пучок вводится в камеру бетатрона с помощью устройства ввода представляющего собой металлический канал, располагаемый в магнитном поле бетатрона и, несомненно, влияющий на структуру магнитного поля вблизи него [5].

Целью работы является измерение основных характеристик электромагнита безжелезного импульсного бетатрона и сравнение расчетных характеристик распределения магнитного поля с нашими экспериментальными данными.

Данное исследование представляет интерес для оценки точности сборки и выявления искажений магнитного поля вносимого расположенными в непосредственной близости от электромагнита металлическими частями функциональных узлов.

Для достижения этой цели в работе поставлены и решаются следующие задачи:

1. Исходя из выходных параметров системы питания и используя данные по расчету электромагнита, оценить величину формируемого магнитного поля и разработать миниатюрные индукционные датчики, обеспечивающие необходимый уровень измеряемого сигнала.

2. Разработать конструкцию системы измерения, позволяющую позиционировать датчики в произвольной точке плоскости симметрии электромагнита.

3. Провести измерения распределения магнитного поля по радиусу электромагнита при последовательном включении катушек электромагнита.

4. На базе измеренных характеристик электромагнита рассчитать: положение равновесной орбиты; распределение показателя спада по радиусу.

5. Провести измерения распределения магнитного поля по азимуту на равновесной орбите в свободном электромагните, а также при внесении в него токопроводящего объекта, моделирующего устройство ввода инжектора.

6. По полученным данным оценить азимутальную неоднородность магнитного поля в свободном электромагните, а так же локальное возмущение при внесении в магнитное поле токопроводящего объекта, моделирующего устройство ввода инжектора.

Научная новизна работа состоит в измерении индукционным методом основных параметров магнитного поля электромагнита бетатрона БИМ–117М.

Научное положение, выносимое на защиту:

Разработанный индукционный датчик позволяет измерять основные параметры магнитного поля бетатрона:

- Зависимости магнитной индукции от радиуса;
- Показатель спада магнитного поля на равновесном радиусе;
- Азимутальную асимметрию магнитного поля;

## **1. Теоретический анализ**

### **1.1 Описание принципов работы бетатронной установки**

Бетатрон является одним из первых циклических ускорителей заряженных частиц. В нем пучок электронов, двигающихся на стационарной круговой орбите, ускоряется вихревым электрическим полем, возбуждаемым

переменным магнитным потоком [6]. Устойчивость частиц на орбите обеспечивается пространственным распределением магнитного поля: оно должно медленно спадать по радиусу.

При малых отклонениях электронов от орбиты возникают возвращающие силы, величина которых пропорциональна отклонению. Движение в поле таких сил носит колебательный характер. В циклических ускорителях эти колебания называются бетатронными колебаниями. На рисунке 1 приведен эскиз конструкции бетатрона. Электроны движутся вблизи равновесной орбиты, совершая колебания в пределах зоны устойчивости 1.

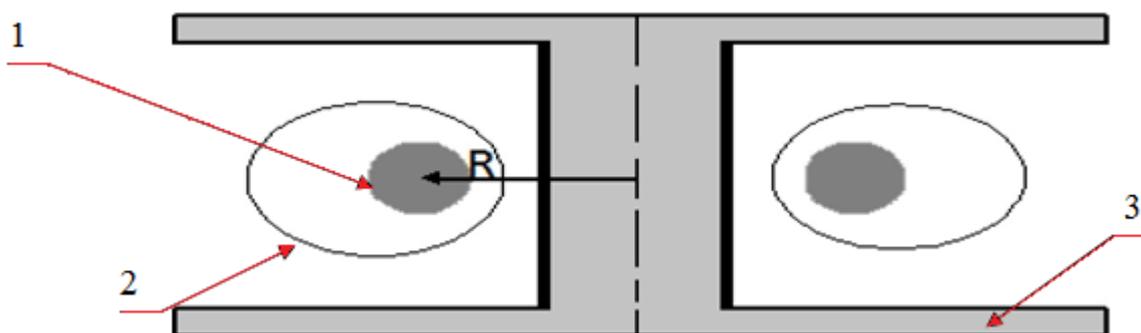


Рисунок 1 – Эскиз конструкции бетатрона:

1 – область устойчивости электромагнита, 2 – стенки ускорительной камеры, 3 – корпус с обмоткой электромагнита

Стационарность орбиты обеспечивается синхронным изменением ведущего магнитного поля на орбите  $B(R_0)$  и магнитного потока пронизывающего орбиту, причем выполняется так называемое «условие 2:1»

$$\overline{B(R_0)} = 2B(R_0) \quad (1.1)$$

Согласно этому соотношению магнитная индукция на равновесной орбите должна быть в два раза меньше среднего значения магнитной индукции в круге радиуса  $R_0$ . При этом скорость изменения энергии электрона движущегося по данной орбите автоматически согласуется со скоростью

нарастания магнитной индукции на орбите. Всякой частице с энергией  $E$ , отвечает своя орбита – окружность, на которой выполняется баланс сил, действующих на нее. Энергия частиц в любой момент цикла ускорения связана с  $B_z$  соотношением:  $E \approx 300BR$ , при этом радиус орбиты  $R=R_0$ , в безжелезном бетатроне, жестко связан с геометрией электромагнита, а индукция магнитного поля  $B_z$  определяется током в обмотке, который обычно изменяется по синусоидальному закону. Важно также то, что для электронов, движущихся по орбите с радиусом меньше равновесного, скорость увеличения энергии превышает скорость роста поля на орбите и радиус растет, приближаясь к равновесному. Для электронов, движущихся на радиусах больше равновесного, набор энергии отстает от скорости роста магнитной индукции, и орбита уменьшается, также приближаясь к равновесной.

Процесс формирования кольцевого пучка электронов на орбите называется инжекцией. Предварительно ускоренные в инжекторе электроны впрыскиваются в ускорительную камеру вблизи границы области устойчивости. Пучок ускоренных в бетатроне электронов используется для генерации тормозного излучения. Пучок направляют на расположенную в ускорительной камере мишень с большим  $Z$ , при этом торможение электронов сопровождается генерацией жестких  $\gamma$ -квантов излучения. Эскиз ускорительной камеры представлен на рисунке 2. В сильноточных безжелезных бетатронах типа БИМ реализуется мегавольтная инжекция, при которой предварительно ускоренные электроны впрыскиваются в ускорительную камеру с помощью устройства ввода. Это устройство представляет собой толстостенную медную трубу заканчивающуюся коническим профилированным участком [7]. Эта труба экранирует внутреннюю часть канала от магнитного поля бетатрона и является

металлическим предметом наиболее близко расположенным к орбите. Канал снабжен специальным профилированным экраном, минимизирующим влияние канала на магнитное поле бетатрона.

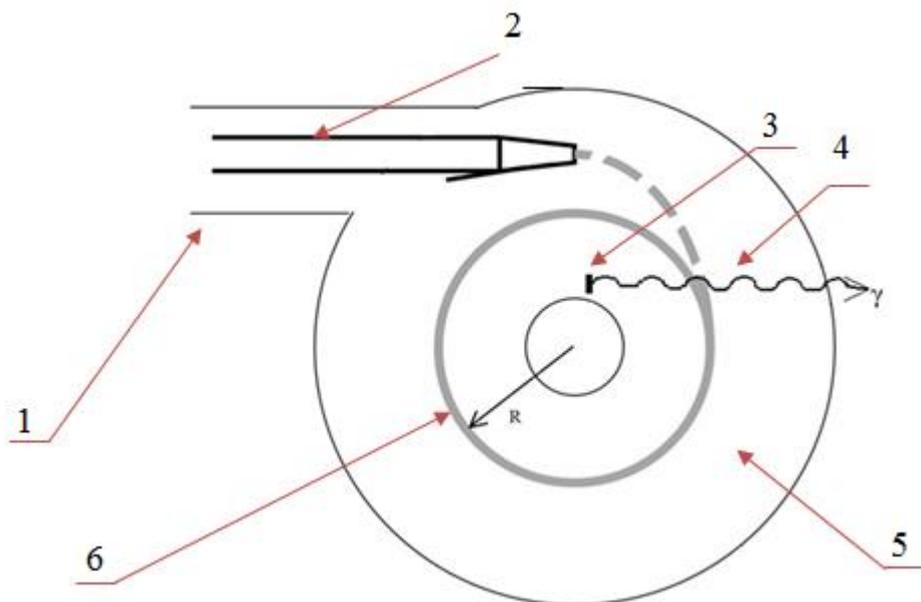


Рисунок 2 – Эскиз ускорительной камеры и ее узлов:

1 – инжекторный патрубок, 2 – выход инжектора, 3 – мишень, 4 – гамма-излучение, 5 – камера ускорения, 6 – равновесная орбита

Тем не менее, это влияние может быть значительным, и его предстоит оценить в ходе экспериментов по измерению структуры магнитного поля.

## 1.2 Фокусировка движения электрона в магнитном поле бетатрона

У магнитного поля бетатрона кроме задачи по возбуждению вихревого электрического поля существует задача по фокусировке ускоряемого пучка электронов. Под фокусировкой понимается условия, при которых силы, действующие на пучок при его отклонении от орбиты, возвращали бы его на рассчитанную траекторию движения.

В начале процесса ускорения, при инжекции, пучок частиц получает разброс по углам, энергиям и координатам около равновесных значений. Затем, частицы, в циклических ускорителях, проходят огромный путь,

совершая большое число оборотов. При этом они неизбежно подвергаются действию различных возмущений, связанных с несовершенством магнитных систем, неточностям в ускоряющих устройствах, неполным вакуумом и т.п. Поэтому решающее значение для нормальной работы ускорителя имеет устойчивость движения частиц.

В классическом бетатроне формируется аксиально симметричное магнитное поле, отличающееся тем, что все его характеристики не зависят от азимутального угла  $\theta$ . Движение частиц будет устойчивым, если при небольшом отклонении их от равновесной окружности возникает возвращающая сила, в радиальном ( $r$ ) и вертикальном ( $z$ ) направлениях. Обратимся сначала к движению в плоскости  $z=0$ . Для устойчивости в радиальном направлении нужно, чтобы сила Лоренца  $F_L = e \cdot v \cdot B$  и центробежная  $F_c = m v^2 / r$  удовлетворяли условию:

$$\begin{aligned} F_L < F_c, \text{ при } r < R; \\ F_L > F_c, \text{ при } r > R; \end{aligned} \quad (1.2)$$

Центробежная сила падает с радиусом пропорционально  $1/r$ . Для малых радиальных отклонений от равновесной орбиты можно положить, что:

$$\begin{aligned} F_c(r) &= F_c(R) \cdot [1 - x/R + \dots], \\ F_L(r) &= F_L(R) \cdot [1 - n x/R + \dots]; \end{aligned} \quad (1.3)$$

Где  $x=r-R$ , а  $n$ – величина, часто встречающаяся в теории ускорителей и называемая показателем спада магнитного поля [8]:

$$n = - \frac{\partial B}{\partial r} \cdot \frac{R}{B} \quad (1.4)$$

Эта величина характеризует собой скорость изменения магнитного поля по радиусу в окрестности равновесной орбиты. Согласно (1.2) и (1.3),

условием устойчивости радиального движения является неравенство  $n < 1$  влияние, которого показано на рисунке 3.

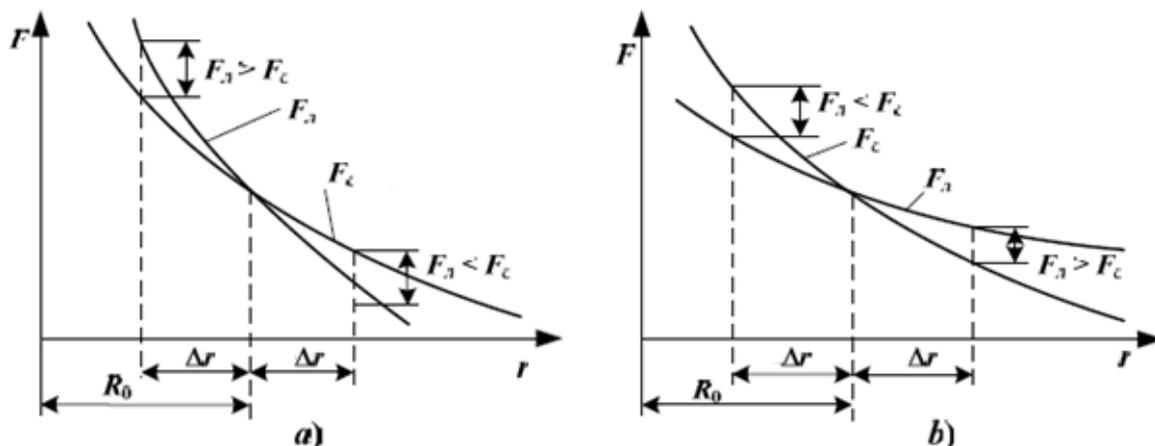


Рисунок 3 – Графики зависимости центробежной силы и силы Лоренца от радиуса при различных  $n$ : а) –  $n > 1$ ; б) –  $n < 1$

Положим, что электрон случайно отклонился от равновесной орбиты  $R_0$  и попал в точку, отстоящую от центра на расстоянии  $R_0 + \Delta r$ . Тогда, как видно из рисунка 3, в случае *a*, центробежная сила окажется превышающей силу Лоренца  $F_C > F_L$ , и в результате электрон будет ещё дальше смещаться в сторону больших значений  $r$ , т. е. он не вернётся больше на равновесную орбиту. Наоборот, в случае *b*, при положении частицы на радиусе  $R_0 + \Delta r$ , мы получаем  $F_L > F_C$ , так что сила Лоренца будет возвращать электрон по направлению к равновесной орбите. Аналогичные обстоятельства имеют место и в том случае, когда электрон, сбившись с равновесной орбиты, попадёт в точку, отстоящую от центра на расстоянии  $R_0 - \Delta r$ . В случае *a* он не возвратится более на равновесную орбиту, так как  $F_L > F_C$ , а в случае *b* – возвратится на неё  $F_C > F_L$ .

Рассмотрим теперь движение в вертикальном направлении (вдоль оси  $z$ ). Сила, действующая в этом направлении  $F_L = e \cdot v \cdot B_r$ , может появиться лишь при наличии радиальной составляющей магнитного поля  $B_r$ , очевидно, что в плоскости симметрии магнитного поля  $z=0$ , где лежит равновесная

окружность  $V_r=0$ . Если  $V_z$  спадает с радиусом, то силовые линии поля будут иметь характерную «бочкообразную» форму, и сила  $F_z$  будет действовать на частицу в направлении плоскости  $z=0$ , то есть фокусировать. Условие устойчивости вертикального движения можно записать, используя понятие  $n$ , в вид  $n>0$ . Таким образом, условие одновременной устойчивости движения по радиусу и по вертикали в азимутально-симметричном поле могут быть записаны в следующей форме:

$$0 < n < 1 \quad (1.5)$$

Выбор конкретного значения показателя спада магнитного поля  $n$  ограничен следующими условиями:

- при  $n > 1$  нарушаются условия радиальной фокусировки пучка;
- при  $n < 0$  будет наблюдаться аксиальная дефокусировка пучка;
- при  $n = 0$  будет нарушена вертикальная фокусировка, так как электроны

вдоль силовых линий магнитного поля свободно попадут на стенки ускорительной камеры.

Наличие сил, возвращающих частицу на орбиту, и пропорциональных отклонениям  $x$  и  $z$ , приводит к тому, что частица в процессе своего движения совершает около орбиты, так называемые бетатронные колебания. При достаточно малых отклонениях  $x$  и  $z$

Эти колебания описываются в азимутально – симметричном поле следующими линеаризованными уравнениями:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2(1 - n)x = 0 \quad (1.6a)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} + \omega^2nz = 0 \quad (1.6b)$$

Как видно из уравнения (1.7а) при значении  $n > 1$  меняется знак второго члена уравнения, что приводит к радиальной дефокусировке. В уравнении (1.7б) при значении  $n < 0$  происходит то же самое, что приводит к аксиальной дефокусировке. В бетатронах принято выбирать значения  $n = 0,4$  или  $0,6$ , так как, при  $n = 0,5$  частоты вертикальных и радиальных бетатронных колебаний совпадают и наступает явление резонанса связи, что приводит к гибели части пучка. В бетатронах типа БИМ, выбрано значение  $n \cong 0,4$ , вследствие чего радиальная фокусировка несколько сильнее вертикальной.

### 1.3 Возмущения структуры магнитного поля и их влияние на динамику пучка электронов в бетатроне

В идеальной аксиально симметричной магнитной системе электрон совершает свободные бетатронные колебания относительно орбиты. Такому движению отвечают уравнения (1.6). В реальной магнитной системе всегда есть возмущения, приводящие к тому, что на электрон действуют дополнительные силы, приводящие к искажению траектории движения [9]. Если в уравнениях движения в качестве независимой переменной взять азимутальный угол  $\theta$ , то возмущения будут повторяться с периодичностью в  $2\pi$ . Такое возмущение можно разложить в ряд Фурье:

$$b = \sum b_k \cos(k\theta);$$

Уравнение вертикального движения при этом становится неоднородным:

$$d^2z/d\theta^2 + nz = b \cdot \cos(k\theta);$$

и его решение, как известно, можно представить в виде суперпозиции общего решения однородного уравнения, то есть свободных бетатронных колебаний, и частного решения неоднородного уравнения имеющего вид:

$$z_1 = \frac{b}{n^2 - k^2} \cos(k\theta) + a_1 \cos(\sqrt{n}\theta) + a_2 \sin(\sqrt{n}\theta); \quad (1.7)$$

Пока  $b/B_0$  является малой поправкой к основному полю, искажения траектории невелики и не приводят к существенному ограничению числа ускоряемых частиц. Из выражения 1.7 видно, что отклонение от медианной плоскости может приобрести необратимый характер, если показатель спада  $n$  будет равняться целому числу. Это условие резонанса, ему соответствуют полосы запрещенных значений  $n$ . Существуют и другие резонансы и соответствующие им запрещенные значения  $n$ . Подробно о резонансах и возбуждающих их силах можно посмотреть в [10]. Из (1.7) видно, что искажение траектории вне условий резонанса пропорционально амплитуде возмущения  $b$  и обратно пропорционально квадрату номера гармоники возмущения.

#### **1.4 Электромагнит безжелезных бетатронов типа БИМ**

Электромагнит безжелезного бетатрона формируется специальным пространственным распределением токонесущих витков. Базовая обмотка бетатронов типа БИМ представляет собой две плоские спиральные катушки соединенные центральным соленоидом. Для повышения азимутальной симметрии генерируемого электромагнитного поля обмотка выполняется многозаходной и двухслойной. Для удобства эксплуатации два слоя обмотки в каждой половине электромагнита соединяются между собой последовательно. При этом электромагнит состоит из двух половин разъединяемых без разрыва токопроводов, например, для монтажа ускорительной камеры. Такое техническое решение защищено патентом РФ [3].

Пространственная структура магнитного поля электромагнита витковой конструкции сохраняется при пропорциональном изменении координат всех витков. На базе одной конфигурации витков разработана серия бетатронов

типа БИМ с радиусом орбиты от 35 до 234 мм. Число заходов обмотки можно изменять исходя из требуемого темпа ускорения, длительности ускорительного цикла и параметров системы импульсного питания. Кроме того отдельные катушки можно соединять параллельно или последовательно изменяя характеристики нагрузки для системы импульсного питания. При этом структура магнитного поля сохраняется.

Данная работа проводилась на шестизаходном электромагните с радиусом орбиты 117 мм – БИМ117М.

Электромагнит состоит из шести катушек в верхнем полюсе электромагнита и шести катушек в нижнем. У каждой катушки есть два собственных вывода, т.е. 12 катушек у всего электромагнита, которые можно подключать как последовательно, так и параллельно друг к другу.

Результат 3D моделирования обмотки приведен на рисунке 4. Конфигурация витков обмотки электромагнита оптимизируется расчетным путем [3].

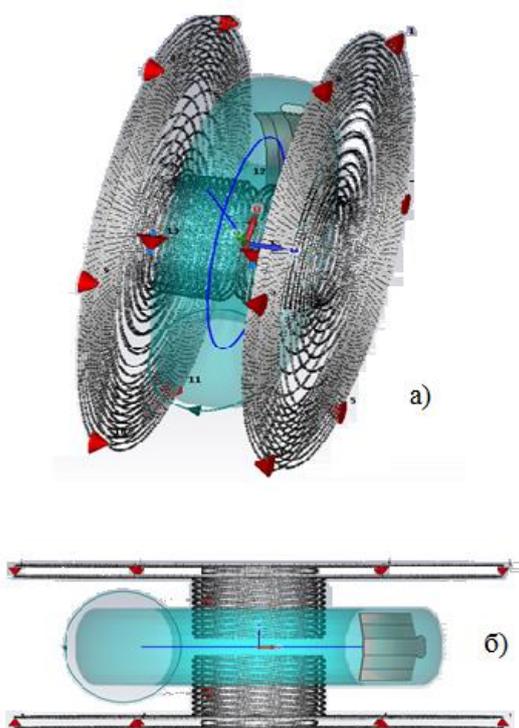


Рисунок 4 – Результат визуализации обмотки электромагнита

При этом структура магнитного поля представляется в виде геометрического фактора  $G$ , а переход к распределению магнитной индукции или напряженности магнитного поля осуществляется умножением его на величину тока и соответствующий переводной коэффициент. Ниже приведены основные характеристики электромагнита, рассчитанные для бетатрона БИМ117М. Связь магнитной индукции на равновесном радиусе электромагнита с током в витках, при параллельном включении всех катушек обмотки, дается соотношением  $B(R_0)=87 \cdot 10^{-4} \cdot I$  Т/кА.

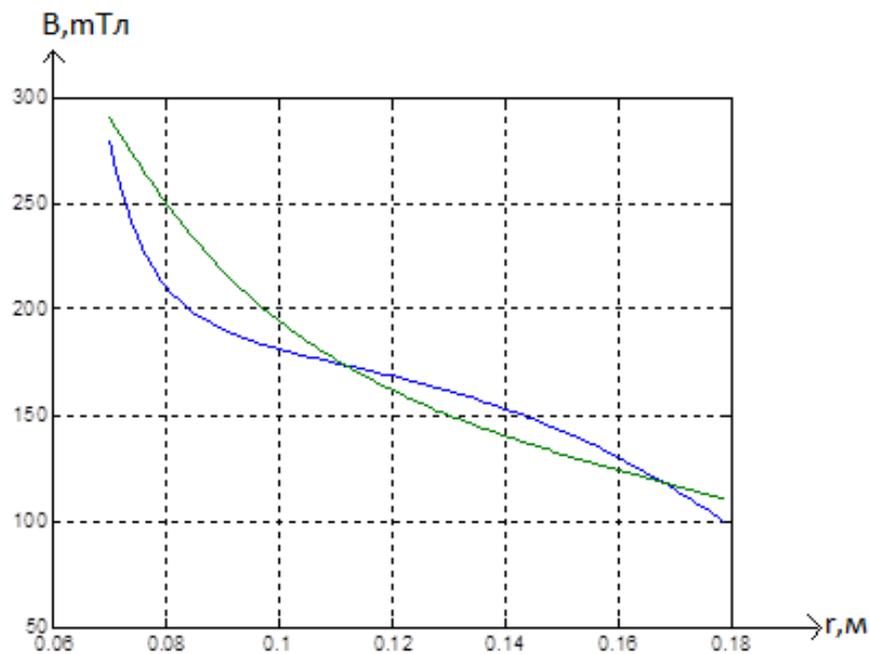


Рисунок 5 – Распределение магнитного поля по радиусу

1 – зависимость  $B(r)$ ; 2 – зависимость  $0.5 \cdot \overline{B_z(r)}$

Центральное пересечение кривых на рис. 5 отвечает радиусу равновесной орбиты, пересечения слева и справа определяют границы области устойчивого движения.

Расчетный радиус равновесной орбиты равен 112 мм.

Показатель спада на равновесной орбите  $n_0 = 0,39$ .

Связав ток, магнитную индукцию на орбите, энергию частиц  $E$ , и радиус орбиты, получаем еще одну характеристику – связь энергии с током в электромагните  $E=3,5$  МэВ/кА.

Орбита, относительно которой осуществляется движение частицы с заданной энергией в заданный момент времени, определяется балансом сил и может не совпадать с равновесным радиусом бетатрона. На рисунке 6 приведена зависимость показателя спада на данном радиусе равновесия от радиуса.

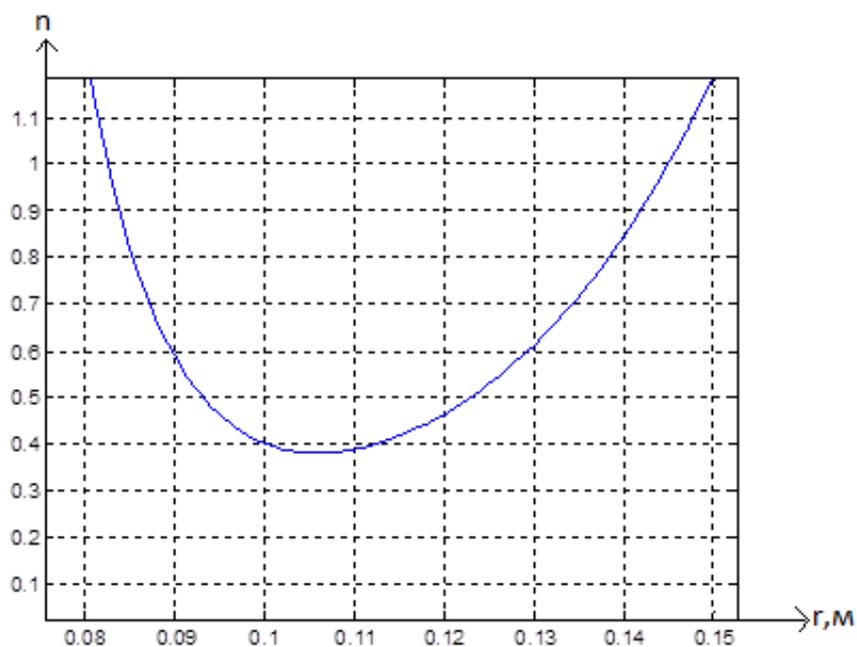


Рисунок 6 – График зависимости показателя спада от радиуса

Азимутальную неоднородность магнитного поля на равновесном радиусе можно оценить, представив поле в виде азимутально симметричной основной части  $B_z$  и зависящей от азимута добавки  $b_z(\varphi)$ . Результат оценки расчетным путем  $B_z(\varphi)$  в средней плоскости электромагнита на равновесном радиусе приведен на рисунке 7.

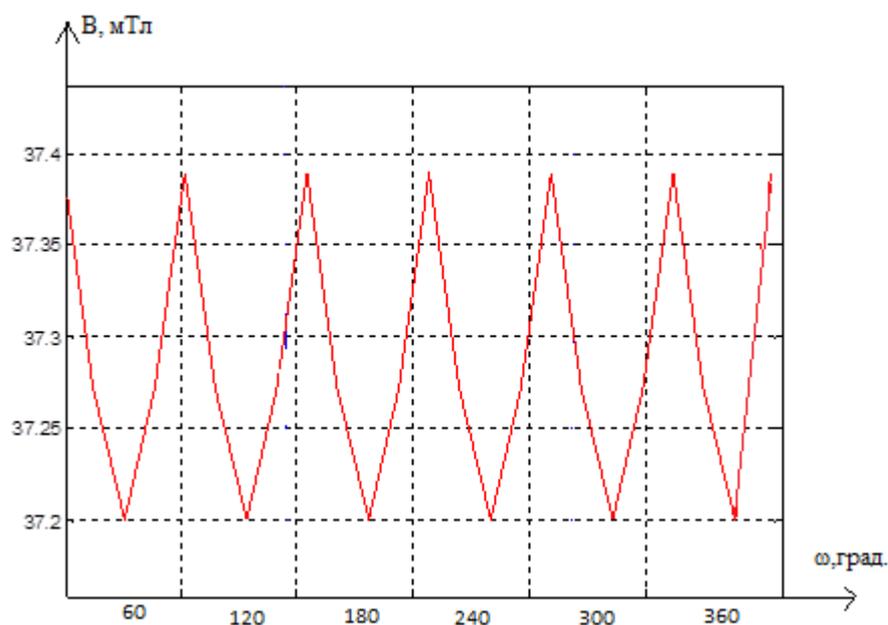


Рисунок 7 – Результат расчета азимутальной неоднородности магнитного поля на равновесном радиусе

Сигнал имеет шесть периодов на обороте электромагнита. Величина относительной неоднородности  $b_z(\varphi)/B_z$  не превышает  $\pm 0,25\%$ .

## 2. Экспериментальная часть

Весь объем перечисленных во введении задач был выполнен в ходе проведения работы. Был создан экспериментальный стенд, проведены необходимые измерения и результаты обработаны. Ниже приведено описание работы и изложены результаты.

### 2.1 Индукционная методика измерения магнитной индукции

Для проведения измерений структуры магнитного поля бетатрона была выбрана индукционная методика. Она является традиционной для измерений в бетатроне [2]. Основана она на применении компактных измерительных катушек – датчиков, помещаемых в межполюсное пространство электромагнита. В качестве датчика использовались цилиндрические однослойные катушки. Позиционируя зонд в серии

фиксированных точек по радиусу, в средней плоскости электромагнита, получаем информацию о распределении магнитной индукции по радиусу, на основе которой потом вычисляются положение равновесной орбиты, показатель спада магнитного поля и размеры области устойчивости.

Согласно теории Фарадея об электромагнитной индукции, при изменении магнитного потока проходящего через замкнутый контур, в нем будет индуцирована ЭДС, прямо пропорциональная скорости изменения магнитного потока  $\Phi$ :

$$U = -d\Phi/dt .$$

Для правильно ориентированной цилиндрической катушки это означает

$$U = -dB_z/dt \cdot N \cdot S, \quad (2.1)$$

где  $N$  – число витков катушки, а  $S$  – эффективная площадь сечения витка. Производная магнитной индукции  $dB_z/dt$ , в безжелезном бетатроне, определяется скоростью изменения тока в электромагните. Безжелезные бетатроны работают в режиме генерации однократных импульсов ускорения. При питании электромагнита разрядом конденсаторной батареи через обмотку с помощью управляемого коммутатора, изменение тока в контуре определяется параметрами контура и напряжением на конденсаторе и имеет полусинусоидальную форму. Чтобы исключить переходной процесс и влияние коммутационных шумов, измерения проводились в максимуме тока электромагнита. Для этого сигнал индукционного датчика интегрировался электронным интегратором. Воспроизводимость тока контролировалась с помощью опорной катушки расположенной в фиксированной точке, сигнал которой также интегрировался другим электронным интегратором.

Регистрация сигналов осуществлялась цифровым осциллографом TDS–2014. Стандартная точность измерения амплитуды сигнала равна 2%.

Для повышения точности измерений каждая точка регистрировалась в серии из 3–5 импульсов, сигналы усреднялись.

Для повышения точности измерения градиентов магнитной индукции обычно используется схема измерения с двумя катушками, расположенными на фиксированном расстоянии друг от друга и включенными встречно. Тогда осциллографом, с той же точностью 2%, измеряется разность сигналов двух катушек. При этом катушки должны быть выполнены одинаковыми с высокой точностью. Далее по тексту такой датчик будем называть дифференциальным. Компенсировать погрешность изготовления катушек можно, когда каждое измерение повторяется с разворотом пары катушек на 180 градусов и сигналы суммируются.

Все измерения носят относительный характер. При этом не требуется перевода измеряемого напряжения в магнитную индукцию. Абсолютная калибровка индукционных датчиков производилась с помощью калибровочной катушки, связь магнитной индукции с током в витках которой рассчитывалась. Эта же катушка использовалась для контроля точности изготовления дифференциального датчика. Для этого он помещался в область с высокой однородностью магнитного поля, и получаемый сигнал использовался для расчета погрешности изготовления катушек.

## **2.2 Описание экспериментальной установки**

Установка для измерения структуры магнитного поля бетатрона состоит из следующих узлов:

- источник импульсного питания;
- электромагнит;
- измерительные датчики и устройство позиционирования;
- два интегратора;

- осциллограф TDS–2014;
- устройство дистанционного запуска.

На рисунке 8 приведена блок схема измерительного стенда.

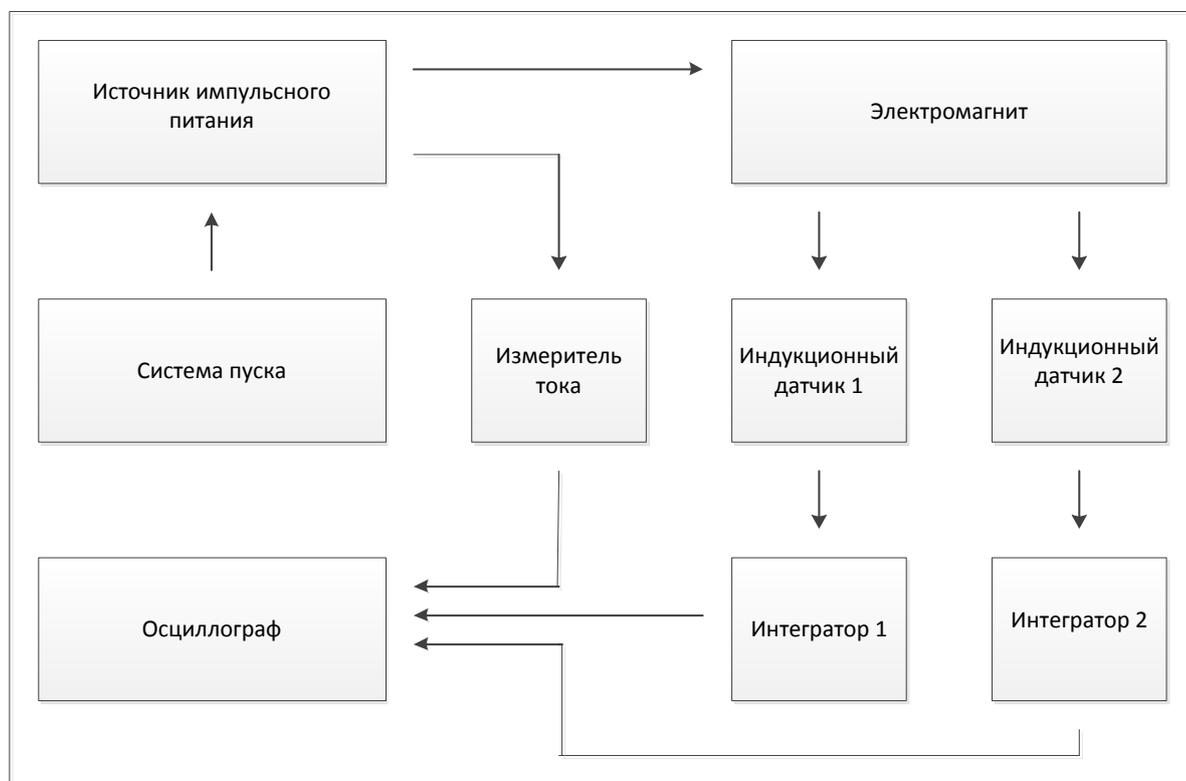


Рисунок 8 – Блок-схема экспериментальной установки

В качестве источника импульсного питания использовался один из функциональных узлов бетатронной установки БИМ234.3000 [7], обеспечивающий формирование в электромагните импульса тока амплитудой порядка 100 А. В разрядный контур включалось измерительное сопротивление  $R=0,15$  Ом, для измерения формы тока. Основной индукционный датчик закреплялся в устройстве позиционирования, смонтированном на центральном соленоиде электромагнита. Второй датчик использовался в качестве сигнала сравнения. Он закреплялся в медианной плоскости электромагнита на предполагаемом радиусе равновесной орбиты. В качестве интеграторов использовались узлы, разработанные вне рамок данной работы. Индукционные датчики соединялись с интеграторами

коаксиальными кабелями длиной 2 м. Все импульсные сигналы регистрировались четырехканальным осциллографом TDS-2014 [11]. Источник импульсного питания, интеграторы и электромагнит располагались в экспериментальном зале. Осциллограф и устройство пуска располагались в пультовом помещении на расстоянии порядка 20 метров от электромагнита. Сигналы передавались по коаксиальным кабелям РК-50-6. Для уменьшения электромагнитных наводок осциллограф питался от Источника бесперебойного питания, а в основной измерительный канал включался фильтр высоких частот.

### 2.2.1 Система импульсного питания

Питание электромагнита осуществлялось генератором импульсного тока (ГИТ), упрощенная электрическая схема которого, приведена на рисунке 9. Емкостной накопитель  $C1=2\mu\text{F}$  заряжался от прецизионного источника высокого напряжения и с помощью управляемого коммутатора разряжался через обмотку электромагнита. В качестве коммутатора используется водородный тиратрон с холодным катодом ТДИ1-50/16.

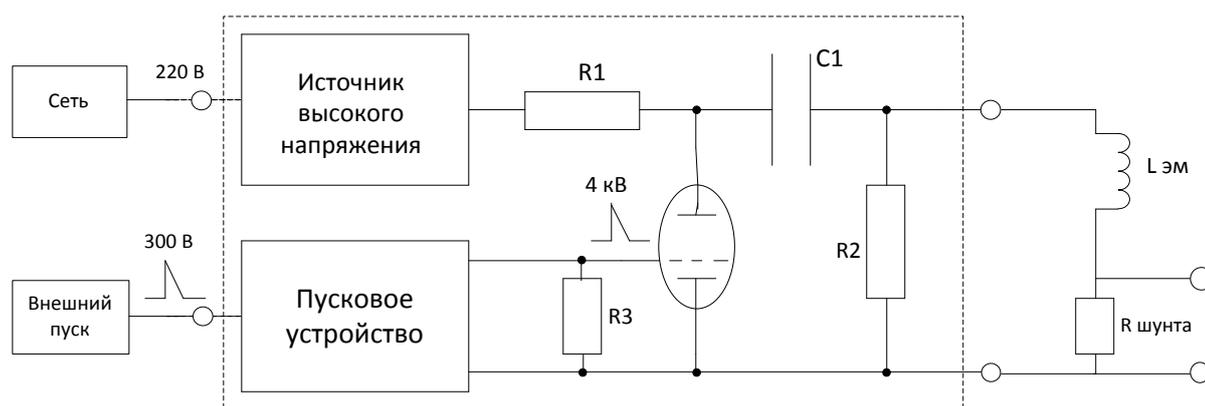


Рисунок 9 – Упрощенная электрическая схема генератора тока электромагнита

На рисунке 10 приведена фотография генератора импульсов тока.



Рисунок 10 – Фотография генератора импульсов тока: 1– индикатор высокого напряжения; 2– индикатор срабатывания; 3– переключать дистанционного и ручного управления; 4– прецизионный переключатель, позволяющий задать уровень напряжения в ручном режиме с точностью до десятков вольт; 5– сетевой выключатель; 6– выключатель высокого напряжения; 7– кнопка «Пуск».

Точность задания напряжения 0,2%. Генератор запускается от внешнего управляющего сигнала положительной полярности с амплитудой 300 вольт.

Важным параметром для вычисления абсолютных величин, является ток, протекающий в электромагните. С целью его оценки в обмотку коаксиального кабеля питания электромагнита был встроен шунт ( $R_{ш}$  на рисунке 9) с известным сопротивлением  $R_{ш}=0,15$  Ом, оснащенный разъемом, предназначенным для выведения снятого с него сигнала на осциллограф.

Рабочее напряжение ГИТ выбиралось так, чтобы тиратрон запирался после прохождения первой полуволны тока.

### 2.2.2 Электромагнит

Измерения проводились в электромагните БИМ117М, конструкция обмотки которого была ранее описана в разделе 1.5. Катушки электромагнита монтируются в корпусе из стеклопластика. Фотография электромагнита с собранным устройством позиционирования индукционного датчика приведена на рисунке 11: 1– электромагнит установок БИМ117М; 2– электромагнит установок БИМ234.3000 с увеличенным в 2 раза радиусом орбиты.



Рисунок 11 – Фотография электромагнита: 1– электромагнит установок БИМ117М; 2– электромагнит установок БИМ234.3000

Электромагнит состоит из двух половин, которые разъединяются в средней плоскости без разрыва токопроводов. Спиральная конструкция

катушек, непрерывность токопровода и его динамическая незакрепленность обеспечивают механическую прочность устройства.

В данной серии измерений все катушки электромагнита включались последовательно. Индуктивность обмотки, измеренная мостовым прибором, составила  $L = 1,127 \times 10^{-3}$  Гн. Волновое сопротивление контура образованного электромагнитом с источником питания равно 23,7 Ом.

При питании от описанного выше источника тока с рабочим напряжением на емкостном накопителе 3 кВ, ток в контуре, без учета затухания должен составить 126 А. Осциллограмма импульса напряжения на  $R_{ш}$ , обработанная линейной фильтрацией, приведена на рисунке 12.

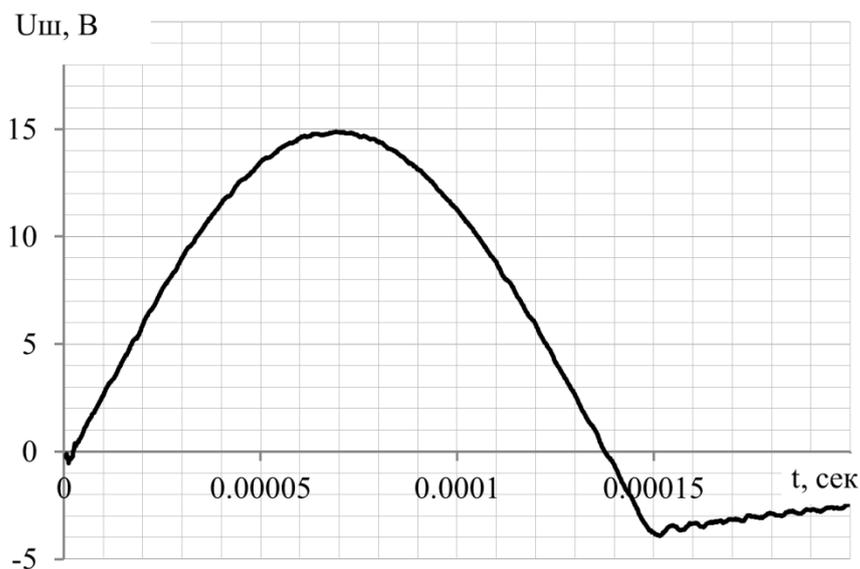


Рисунок 12 – Осциллограмма импульса напряжения на шунте. Амплитуда сигнала напряжения равна 15 В, чему отвечает ток:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{15}{0,15} = 100 \text{ А.}$$

Разница между расчетным и измеренным значением определяется затуханием тока за счет активного сопротивления контура. Расчётная величина магнитной индукции на радиусе равновесной орбиты, при токе в обмотке электромагнита равном 100 А, равна 0,0104Т.

## 2.2.3 Измерительная система

### 2.2.3.1 Индукционные датчики и устройство позиционирования

В качестве датчиков использовались цилиндрические однослойные катушки, геометрия которых рассчитывалась исходя из параметров генератора импульсного тока и минимального сигнала, который можно уверенно зарегистрировать осциллографом на фоне наводок. Ток в контуре определяется соотношением:

$$I = I_0 \cdot e^{-t/\tau} \cos \omega t,$$

где,  $I_0 = U/\rho$ ,  $e^{-t/\tau}$  – коэффициент затухания,  $\tau = R/2L$ ,  $\omega = \sqrt{LC}$ ; и

$$\rho = \sqrt{L/C} \text{ – волновое сопротивление контура; } R \text{ – его активное}$$

сопротивление. При напряжении источника  $U = 3.0$  кВ, ёмкости  $C = 2$  мкФ ток в обмотках электромагнита (ЭМ) составит:

$$I_0 = U \sqrt{\frac{C}{L}} = 126 \text{ A.}$$

Используя коэффициент связи магнитной индукции и тока в электромагните находим поле на радиусе орбиты:

$$B \approx 10 \times 10^{-4} \text{ T}$$

По максимальному значению магнитного поля оценим количество витков ( $N$ ) и площадь сечения ( $S$ ) измерительной катушки. Расчет проведем исходя из условия, что амплитуда регистрируемого на осциллограмме импульса с него должна составлять не менее  $0,02$  В, следовательно:

$$U_L = NSB\omega = 0,02.$$

$$\text{Тогда } NS = \frac{0,02}{B\omega} = 8,8 \times 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Предполагается, что интегрирование сигнала будет производиться электронным интегратором практически без потери амплитуды сигнала.

Минимальный диаметр провода ( $D=0,08$  мм) и ограничение в поперечных размерах катушки (обусловленные глубиной пазов  $h=10$  мм в основании электромагнита) не позволяют в большом диапазоне манипулировать количеством витков ( $N$ ):

$$N \leq \frac{h}{D} \leq 125$$

Такое их количество, исходя из рассчитанного коэффициента  $NS$ , соответствует площади сечения равной  $S=7,04 \times 10^{-6} \text{ м}^2$ , то есть радиусу  $r=1,49$  мм. Выбираем радиус больше,  $r=2,5$  мм, чтобы увеличить уровень минимального сигнала.

Теперь, исходя из рассчитанных параметров индукционных датчиков, необходимо разработать конструкцию их крепления которая бы удовлетворяла следующим критериям:

1. Вывод индуцированного в катушках сигнала должен осуществляться коаксиальным кабелем, оснащенный разъемом позволяющим осуществлять оцилографию.

2. Малое поперечное сечение медного провода ПЭВ2-008 используемого в качестве обмотки индуктивного элемента ( $0,08 \text{ мм}$ ) должно быть учтено в способе его крепления к измерительной линии с целью предотвращения обрыва цепи в процессе эксплуатации.

3. Конструкция должна быть достаточно проста для изготовления и сборки.

Исходя из соответствия вышперечисленным требованиям была разработана конструкция измерительной линейки показанная на рисунке 13.

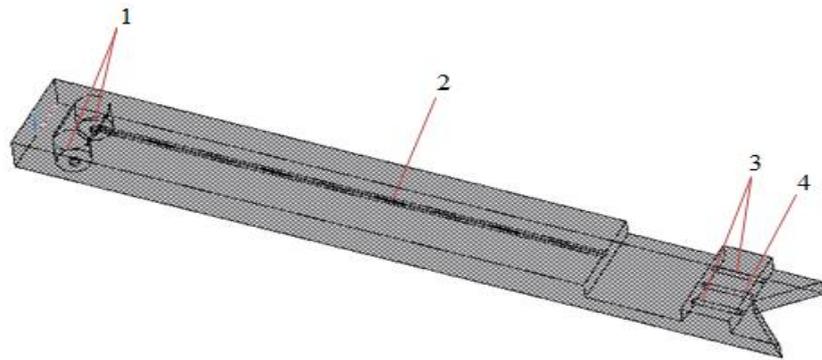


Рисунок 13 – Конструкция измерительной линейки для индукционных датчиков:

- 1- отверстия для размещения измерительных катушек;  
 2- паз для вывода проводов обмоток катушек; 3- отверстия для фиксирования электродов, к которым будут паяться выводы катушек и измерительного кабеля; 4- отверстия предназначенные для коаксиального кабеля

Фотография индукционного датчика в сборе приведена на рисунке 14.

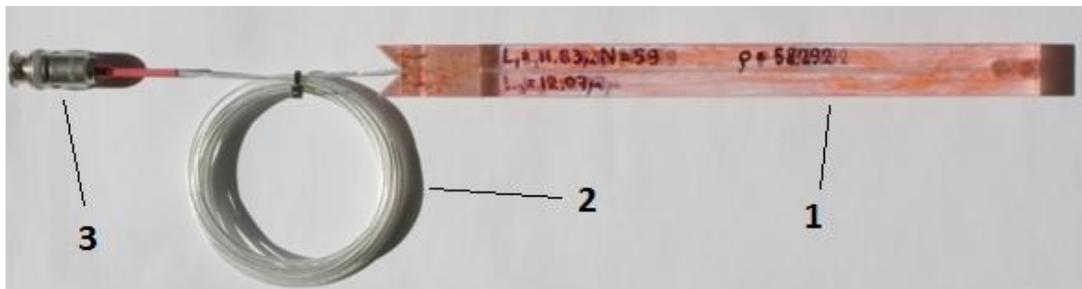


Рисунок 14 – Фотография индукционного датчика, где 1–«линейка» для крепежа измерительных катушек, 2–кабель передачи информации, 3– разъем для подключения к осциллографу.

Фиксация индукционного датчика в заданной точке плоскости симметрии ЭМ осуществляется с помощью устройства позиционирования, детали конструкции которого показаны на рисунке 15. Накидные кольца (1), внутренний диаметр которых совпадает с диаметром центральной части корпуса электромагнита, фиксируют раму (2) от смещения в поперечных плоскостях и оставляют свободу ее вращения по азимуту. Паза в кольцах

обеспечивают перемещение индукционных датчиков в центральной части электромагнита. В свою очередь паз (3) в раме 2 обеспечивает возможность изменения координат линейки по радиусу электромагнита, что позволяет совершать измерения от оси электромагнита до максимального радиуса.

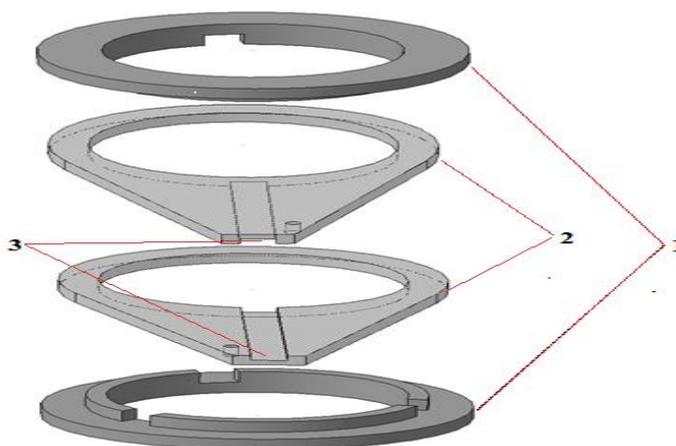


Рисунок 15 – Детали конструкции крепления измерительной линейки на корпусе электромагнита:

1–накидные кольца; 2– рама для фиксации положения датчика; 3–паз для перемещения датчика по радиусу

### 2.2.3.2 Интеграторы

В работе использовалось два интегратора с разными коэффициентами усиления. Линейность измерительного канала необходима для проведения правильных измерений. Для проверки их линейности и расчета коэффициента усиления интеграторы подключались к датчику поля, расположенного в калибровочной катушке, положение которого фиксировалось. Сигнал регистрировался осциллографом. Меняя напряжение на источнике питания, измерялась амплитуда проинтегрированного сигнала. Графики зависимостей амплитуды выходного напряжения от напряжения источника тока электромагнита приведены на рисунке 16.

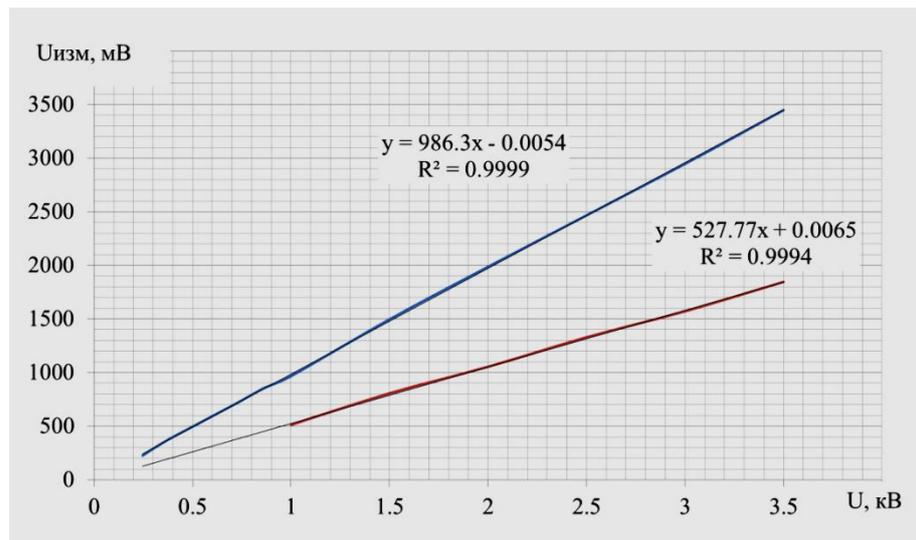


Рисунок 16 – Зависимость выходного напряжения интеграторов от напряжения системы питания электромагнита: верхняя кривая данные для интегратора 2; нижняя кривая – данные для интегратора 1 умноженные на 20

Здесь же приведены уравнения линейной аппроксимации, иллюстрирующие линейность устройств с высокой степенью точности.

Отношение коэффициентов усиления интеграторами одного и того же сигнала, полученное из графика,  $K_{21}=37,2$ .

На рисунке 17 приведены осциллограммы сигнала с индукционного датчика без интегратора и с выхода интегратора. Видно, что сигнал датчика содержит высокочастотные наводки, связанные с коммутационными процессами в системе импульсного питания электромагнита. После интегрирования, в максимуме тока, сигнал вполне приемлем для проведения измерений.

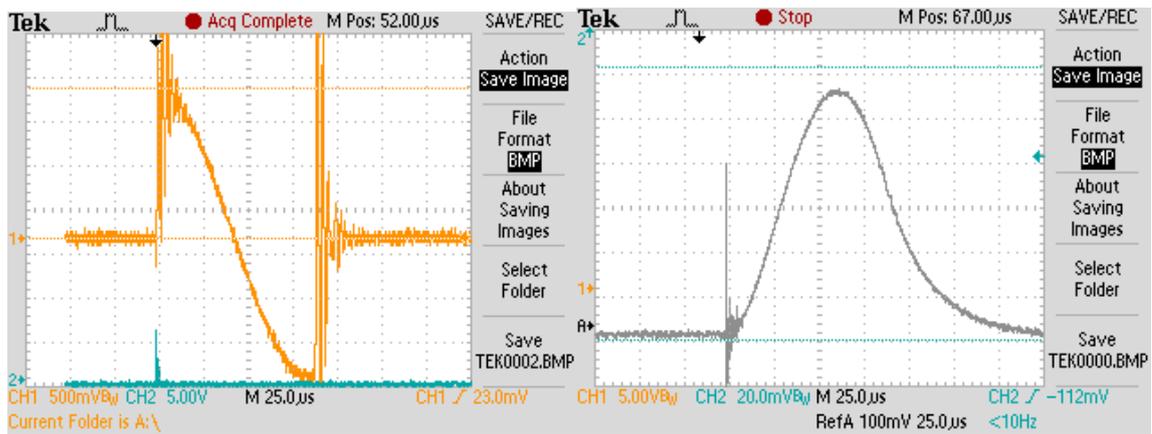


Рисунок 17 – Осциллограммы сигнала индукционного датчика до (слева) и после интегрирования

Существенно улучшает условия измерений ограничение полосы пропускания осциллографа (до 20 МГц) и применение высокочастотного фильтра.

Для измерений датчиком с одиночной катушкой использовался интегратор с малым коэффициентом усиления, а для измерения дифференциальным датчиком – интегратор с большим коэффициентом усиления.

#### 2.2.4 Калибровка индукционных датчиков

Для калибровки абсолютной чувствительности одиночной катушки использовалась катушка, схематично показанная на рисунке 18.

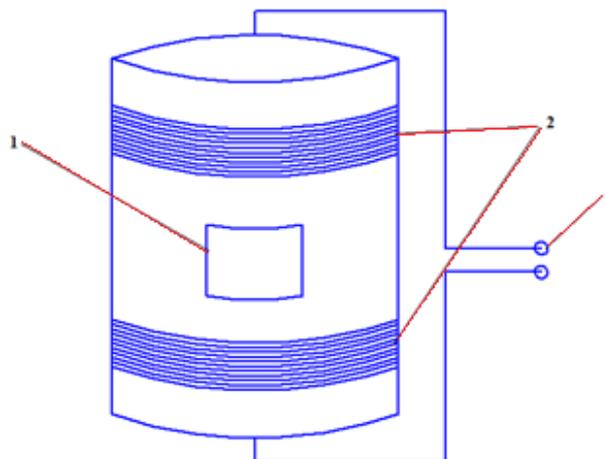


Рисунок 18 – Схематичное представление калибровочной катушки:  
 1–окошко для ввода измерительных датчиков; 2–две последовательно  
 соединенные катушки; 3–выводы питания

Она содержит два коротких однослойных соленоида по 25 витков каждый, намотанных на бакелитовом каркасе диаметром 224 мм. Соленоиды разнесены относительно средней плоскости на расстояние порядка 60 мм. В центральной части находится область с высокой однородностью магнитной индукции. На одинаковом расстоянии от витков, задающих магнитное поле, в каркасе катушки вырезано квадратное отверстие, предназначенное для внесения индукционных датчиков в однородную область магнитного поля.

Связь магнитной индукции с током в обмотке рассчитывается с хорошей точностью. Для данной катушки коэффициент связи  $K_{св}$  равен 0,1804 Т/кА.

Индуктивность катушки 402 мкГн. Катушка подключалась к тому же ГИТ, который используется для питания электромагнита. Параметры разрядного контура:  $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = 14,2$  Ом;  $\omega = 1/\sqrt{LC} = 35237$  рад/с;  $I_0 = U/\rho = 210$  А.

Ток в катушке измерялся сопротивлением  $R_{ш} = 0,15$  Ом.

Амплитуда напряжения равна 26,6 В, чему отвечает ток:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{26,6}{0,15} \approx 177 \text{ А.}$$

Зная магнитную индукцию в центре катушки и циклическую частоту  $\omega$ , можно оценить  $NS_{\text{изм}}$  одиночной катушки и сравнить ее площадь с площадью, полученной геометрическим расчетом исходя из диаметра каркаса, диаметра провода и числа витков:  $NS_{\text{геом}} = N\pi(D+d)^2/4 = 0.0012 \text{ м}^2$ . По результатам измерений  $NS_{\text{изм}} = 0.0014 \text{ м}^2$ . Отношение  $NS_{\text{изм}}/NS_{\text{геом}} = 1,17$ , расхождение около 17%. Измеренная индуктивность датчика равна 12.27 мкГн.

Дифференциальный датчик представляет собой две таких же цилиндрических однослойных катушки расположенных на измерительной линейке по радиусу с интервалом по осям равным 10 мм и включенных встречно. Измеренные индуктивности каждой из катушек датчика равны 11,87 мкГн и 12,03 мкГн. Качество изготовления дифференциального датчика определяется сравнением амплитуды сигнала полученного с него в однородном магнитном поле с сигналом, индуцированным в одиночной катушке. Для идеального дифференциального датчика сигнал должен равняться 0.

Измеренная амплитуда сигнала составила 0.0086 В, при амплитуде одиночной катушки в тех же условиях 0.544 В. Связанная с этим добавка к сигналу составляет 1.5% от сигнала одиночной катушки, расположенной в том же месте. Эта добавка является систематической и учитывалась при обработке результатов измерений.

### **2.2.5 Учет погрешностей измерений**

Источниками погрешностей при проведении измерений являются неточность изготовления датчиков, ошибки позиционирования датчиков, погрешности измерения электрических параметров разрядного контура электромагнита и измерительных цепей, погрешности осциллографии. Особое

место занимают погрешности связанные с электромагнитными наводками в измерительных цепях импульсным источником тока.

Во время проведения эксперимента, учитывалась возможная погрешность, связанная с не стабильностью выходного импульса источника тока электромагнита. Для её учета, помимо сигнала с измерительной линейки, в каждом эксперименте снимались показания амплитуды напряжения с опорной катушки, находившейся в фиксированной точке на постоянном радиусе от центра электромагнита. Рассчитывался коэффициент равный отношению среднего значения всех индуцированных на опорной катушке импульсов к значению каждого отдельного из них ( $k$ ). Значения напряжений с катушки измерительной линейки  $U_{л}(r)$  в каждой точке умножались на соответствующее им значение коэффициента и уже по полученным данным оценивалось распределение  $U(r)$ .

$$U_0 / \overline{U_0} = k; \quad U_{л}(r) \cdot k = U_{л}(r)_{\text{кол}}$$

где  $U_0$  амплитуда напряжения опорной катушки,  $\overline{U_0}$  – средняя по серии импульсов напряжение опорной катушки,  $U(r)$ – амплитуда импульса напряжения измерительной катушки,  $U_{л}(r)_{\text{кол}}$  – откалиброванное напряжение.

При работе с высоковольтной импульсной техникой необходимо учитывать возможные «наводки», связанные с протеканием токов в сети и кабелях питания. Для компенсации вносимой ими добавки к измеряемому сигналу, было решено снимать сигнал с измерительных линеек переворачивая их на 180 градусов относительно средней плоскости электромагнита, тогда направление индукционного тока в них будет меняться на противоположное, а направление «наводки», оставаясь постоянным, в одном случае будет добавляться к нему в другом же вычитаться. Поэтому, во всех экспериментах

снималось две серии данных с перевернутыми положениями измерительной катушки  $U(r)\uparrow$  и  $U(r)\downarrow$ , далее находили среднее значение  $U(r)$  в каждой экспериментальной точке.

Погрешность абсолютных измерений цифровым осциллографом типа TDS2014 составляет 2%. Измерение амплитуды сигнала курсорами имеет дискретность 0,5% на всех диапазонах. Повышение точности достигалось измерением сигнала в каждой точке не менее трех раз и нахождением среднего.

Точность выбора напряжения источника импульсного питания равна 0,3%. Воспроизводимость тока от импульса к импульсу при заданных параметрах разрядного контура проверялась набором серии из пяти импульсов с нахождением среднего значения и разброса. Разброс не превышал 1,5% от измеряемой величины.

Положение индукционного датчика по радиусу, при измерении зависимости  $B_z(r)$ , определялось с помощью «колумбуса», при этом точность составляет 0,1 мм. При измерении азимутальной неоднородности окружность разбивалась на 72 сектора с помощью делительной головки.

## **2.3 Результаты измерений**

### **2.3.1 Измерения магнитной индукции по радиусу с помощью одной катушки**

Для измерения зависимости  $B(r)$  использовалась линейка–датчик (смотри рисунок 14), которая двигалась от центра к краю электромагнита с шагом 3 мм, было снято 66 экспериментальных точек. Так как  $B(r)$  пропорционально  $U(r)$  – напряжению на катушке, и нас интересует относительная зависимость, везде в дальнейшем будет рассматриваться  $U(r)$ . В каждом эксперименте источник импульсного питания заряжался до

напряжения  $V=3\text{кВ}$ . Изменяя положение измерительной катушки относительно центра электромагнита, мы измеряли индуцируемое в ней напряжение в данной точке. Сигнал регистрировался осциллографом TDS-2014. Амплитуда каждого сигнала вводилась в электронную таблицу Excel, где и проводилась их дальнейшая обработка. Данные и результат первичной обработки одной серии измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1– Данные для построения зависимости  $B(r)$

№	R, mm	Uл, В	Uл, В2	<Uл>, В	int(S)	int/R <sup>2</sup>
1	0	1,03	0,94	0,985	0	0,4925
2	3	1,03	0,94	0,985	8,865	0,4925
3	6	1,035	0,94	0,9875	26,62875	0,492969
4	9	1,035	0,94	0,9875	44,4375	0,493403
5	12	1,035	0,94	0,9875	62,2125	0,493555
6	15	1,025	0,94	0,9825	79,785	0,493175
7	18	1,03	0,94	0,985	97,39125	0,492778
8	21	1,03	0,94	0,985	115,245	0,492704
9	24	1,025	0,94	0,9825	132,8063	0,49251
10	27	1,03	0,94	0,985	150,5138	0,492377
11	30	1,025	0,94	0,9825	168,2213	0,492281
12	33	1,025	0,94	0,9825	185,6925	0,492102
13	36	1,02	0,92	0,97	202,0838	0,491467
14	39	1,015	0,92	0,9675	217,9688	0,490418
15	42	1,01	0,92	0,965	234,7988	0,489413
16	45	1	0,892	0,946	249,3855	0,48791
17	48	0,98	0,876	0,928	261,423	0,48556
18	51	0,948	0,86	0,904	272,052	0,482413
19	54	0,912	0,828	0,87	279,405	0,478209
20	57	0,844	0,756	0,8	278,055	0,471987
21	60	0,732	0,658	0,695	262,3725	0,462409
22	63	0,6	0,518	0,559	231,363	0,448565
23	66	0,472	0,422	0,447	194,661	0,431057
24	69	0,396	0,358	0,377	166,86	0,411912
25	72	0,352	0,316	0,334	150,3765	0,392805
26	75	0,324	0,296	0,31	142,002	0,374632
27	78	0,301	0,274	0,2875	137,1263	0,357637
28	81	0,295	0,262	0,2785	134,991	0,341924
29	84	0,285	0,256	0,2705	135,8775	0,327565
30	87	0,277	0,252	0,2645	137,2275	0,314429

31	90	0,272	0,246	0,259	138,9893	0,302396
32	93	0,268	0,245	0,2565	141,5048	0,291382
33	96	0,268	0,241	0,2545	144,8685	0,281315
34	99	0,264	0,238	0,251	147,8588	0,272067
35	102	0,261	0,236	0,2485	150,5993	0,263536
36	105	0,26	0,233	0,2465	153,6975	0,255662
37	108	0,257	0,231	0,244	156,7148	0,248374
38	111	0,252	0,229	0,2405	159,1583	0,241588
39	114	0,248	0,226	0,237	161,1563	0,235241
40	117	0,246	0,223	0,2345	163,3748	0,229299
41	120	0,244	0,221	0,2325	166,0185	0,223742
42	123	0,242	0,219	0,2305	168,7635	0,218538
43	126	0,24	0,215	0,2275	171,063	0,213643
44	129	0,233	0,211	0,222	171,9338	0,208988
45	132	0,232	0,209	0,2205	173,2388	0,204567
46	135	0,226	0,205	0,2155	174,618	0,200367
47	138	0,218	0,201	0,2095	174,0375	0,19632
48	141	0,216	0,198	0,207	174,3053	0,192438
49	144	0,213	0,195	0,204	175,7025	0,18874
50	147	0,208	0,188	0,198	175,473	0,185175
51	150	0,202	0,184	0,193	174,1905	0,181713
52	153	0,197	0,179	0,188	173,1645	0,178356
53	156	0,19	0,173	0,1815	171,2633	0,175081
54	159	0,185	0,168	0,1765	169,155	0,171882
55	162	0,18	0,162	0,171	167,3213	0,168762
56	165	0,17	0,155	0,1625	163,5818	0,165686
57	168	0,165	0,147	0,156	159,0908	0,162639
58	171	0,158	0,141	0,1495	155,3468	0,159639
59	174	0,15	0,134	0,142	150,8513	0,156673
60	177	0,14	0,127	0,1335	145,0508	0,153722
61	180	0,13	0,119	0,1245	138,159	0,150773
62	190	0,105	0,0936	0,0993	414,03	0,141054
63	200	0,072	0,0656	0,0688	327,795	0,131399
64	210	0,0448	0,0402	0,0425	228,165	0,121769
65	220	0,0184	0,0146	0,0165	126,85	0,112262
66	230	-0,0088	0,0068	-0,001	34,875	0,103042

В первом столбце таблицы 1, указан номер эксперимента, в следующем расстоянии индукционного датчика от центра электромагнита. В двух следующих приведены показания амплитуды сигнала при прямом и развернутом на  $180^{\circ}$  направлении оси катушки относительно оси магнита. В

каждой точке импульсы повторялись не менее трех раз. Далее находилось среднее значение полученных данных в каждой экспериментальной точке. Для нахождения равновесной орбиты, необходимо построить кривую зависимости  $U_{cp}(r)/2$ , которая вследствие соотношения 2:1 пересекает  $U(r)$  вблизи равновесной орбиты.

По полученным данным была построена зависимость  $U(r)$ .

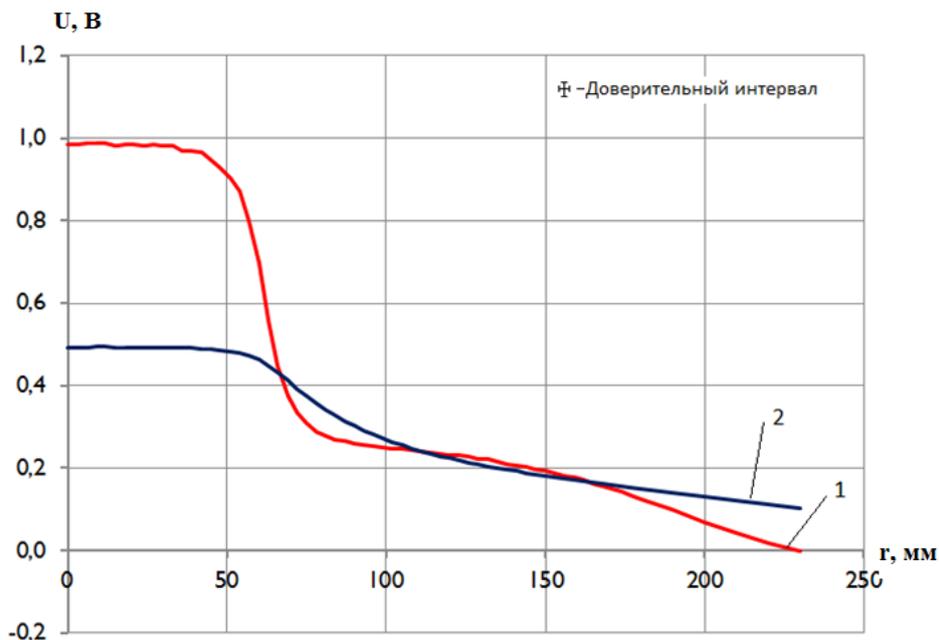


Рисунок 19 – Графики зависимости  $U(r)$  и  $0,5U_{cp}(r)$ : 1– зависимость  $U(r)$ ; 2– зависимость  $0,5U_{cp}(r)$

На рисунке 19 так же показана зависимость  $0,5U_{cp}(r)$ , которая необходима для нахождения радиуса равновесной орбиты.

Среднее значение индукции магнитного поля  $B_{cp}(r)$  в круге равновесной орбиты равно:

$$B_{cp} = \frac{\Phi_0}{2\pi r_0^2} = \frac{1}{2\pi r_0^2} \int_0^{r_0} B(r) 2\pi r_0 dr = \frac{1}{r_0^2} \int_0^{r_0} B(r) r_0 dr$$

Для того что бы построить кривую зависимости  $0,5 \cdot U_{cp}(r)$  необходимо было посчитать интеграл  $\frac{1}{r_0^2} \int_0^{r_0} U(r) r_0 dr$ . Для этого производился расчет

площади под кривой  $U(r)$ , путем деления ее на прямоугольники с одинаковым основанием, равным 3 мм. После чего полученные данные умножались на величину  $\frac{1}{r_0^2}$  и делились на два, для выполнения соотношения 2:1. Как видно из графика, равновесная орбита находится на расстоянии 111–112 мм от центра электромагнита.

Для точного нахождения положения равновесной орбиты, был взят отрезок из 20 точек вблизи пересечения графиков функций  $U_{\text{сп}}(r)$  и  $U(r)$ . Затем мы аппроксимировали значения каждой экспериментальной кривой полиномами в пакете программы Excel. В качестве независимой переменной  $X$  выбиралась разность между текущей координатой  $r$  и предполагаемым радиусом равновесной орбиты  $R_0^*$  то есть  $X=r-R_0^*$ . Степень полинома выбиралась так, чтобы на данном отрезке коэффициент детерминации  $R^2$  был не ниже 0,99. Оказалось для этого достаточно полинома 3-ей степени. Варьируя значение  $R_0^*$ , мы методом подбора добивались равенства свободных членов, уравнений кривых полученных при аппроксимации. При этом мы получили разложение обеих функций по отклонениям от истинной равновесной орбиты  $R_0$ . Значение  $R_0$  получилось равно 111,5 мм.

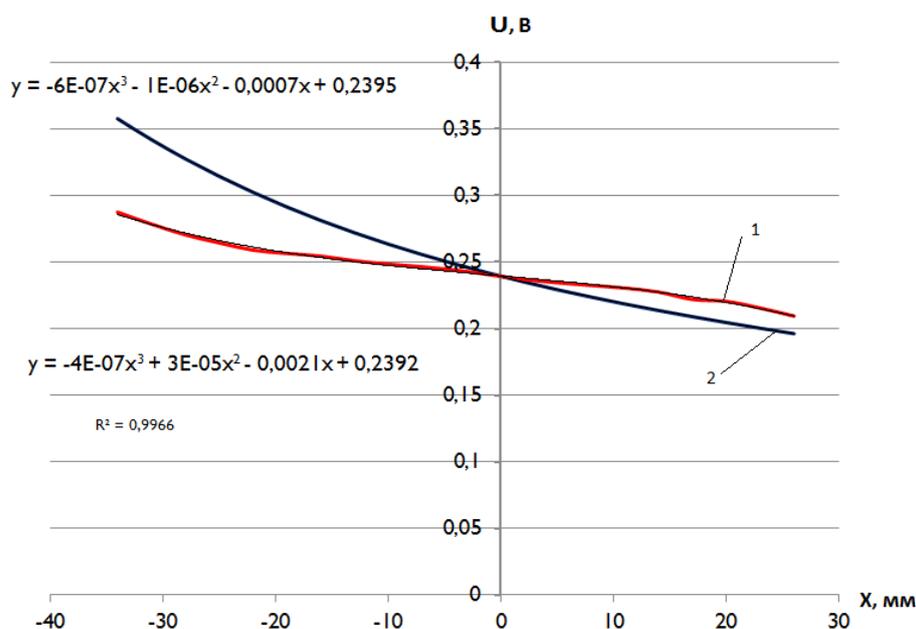


Рисунок 20 – Результат аппроксимации  $U(r)$  и  $\overline{U(r)}/2$  полиномами в окрестности равновесной орбиты

Расчетный радиус равновесной орбиты для этого электромагнита (смотри рисунок 5) равен 112 мм.

Следующим шагом было построение графика зависимости показателя спада от радиуса  $n(r)$ :

$$n = -\frac{\partial B}{\partial r} \frac{r}{B} = -\frac{\partial U}{\partial r} \frac{r}{U}$$

Для расчета  $\partial U / \partial r$ , находилась разность сигналов в двух рядом стоящих экспериментальных точках, затем найденное изменение делилось на постоянный шаг, который в данном эксперименте составлял 3 мм. Полученные данные умножались на радиус и далее делились на напряжение сигнала индукционного датчика соответствующее экспериментальной точке.

Затем проводилась аппроксимация данных, полиномом 3-ей степени для сглаживания кривой и получения её уравнения. Результат приведен на рисунке 21.

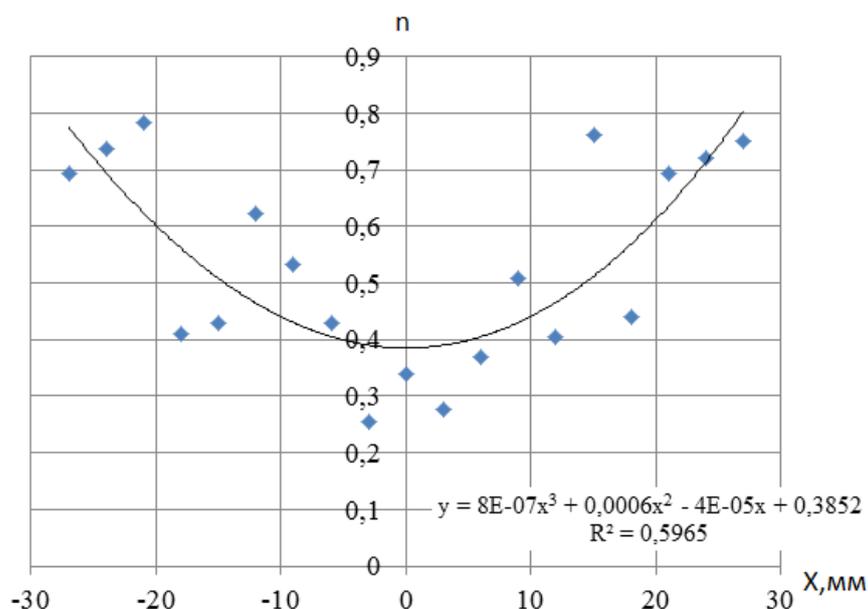


Рисунок 21 – Результат вычисления показателя спада  $n(x=r-R_0)$  по экспериментальным точкам

Как видно из графика, существует большой разброс экспериментальных точек, из-за чего можно сомневаться в точности получения зависимости  $n(r)$ .

Коэффициент достоверности аппроксимации также не велик, однако значение показателя спада на радиусе равновесной орбиты  $n_0=0,385$  примерно согласуется с расчетной величиной  $n_0=0,39$ .

Для повышения точности вычисления показателя спада было решено использовать уже аппроксимированные экспериментальные данные, что должно привести к увеличению точности. Массив данных  $U(r)$  на участке  $X=R_0 \pm 40$  мм аппроксимировался полиномом по степеням  $x$ , причем степень полинома выбиралась так, чтобы  $R^2$  было  $>0,995$ . Данные после аппроксимации полиномом показаны на рисунке 22.

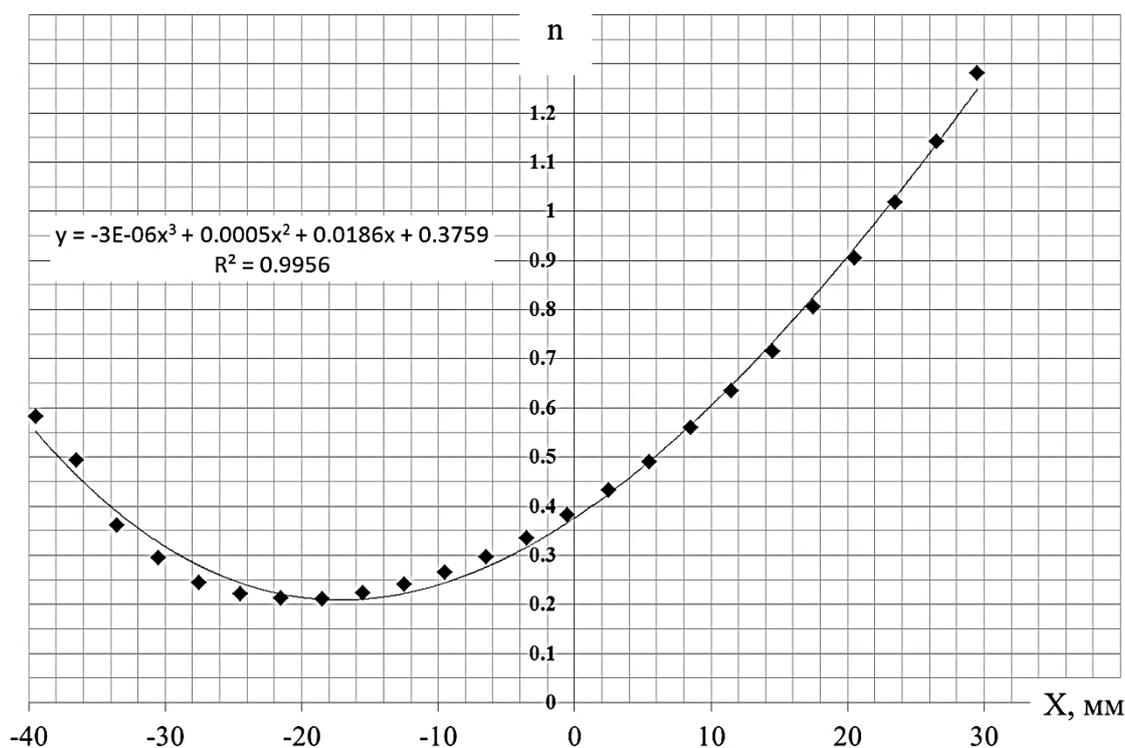


Рисунок 22 – График зависимости  $n(x)$

Как видно из уравнения полиномиальной кривой, на равновесной орбите  $R_0=111,5$  мм, показатель спада  $n=0,375$ .

### 2.3.2 Измерение показателя спада с помощью дифференциальных датчиков

Следующим шагом было измерение индукции магнитного поля с помощью дифференциальных датчиков. Конструкция и результаты калибровки датчиков приведены в разделе 2.1.4. Сигнал дифференциального датчика пропорционален градиенту магнитного поля. При размещении датчика вблизи равновесной орбиты, амплитуда сигнала порядка единиц милливольт.

Датчик подключался к усилителю–интегратору с коэффициентом усиления порядка 20. Вычисление показателя спада осуществляется делением сигнала дифференциального датчика на сигнал, полученный с помощью одной катушки подключенной к другому интегратору. Отношение коэффициентов усиления этих двух интеграторов равно 42,2. Из за разности  $NS$  двух катушек, образующих дифференциальный датчик, величина которой определена калибровкой в однородном магнитном поле (смотри раздел 2.1.4), к регистрируемому сигналу  $U_{\text{дифф}}(r)$  необходимо добавлять поправку  $\Delta U(r)=0.015*U(r)$ , где  $U(r)$  – сигнал одиночной катушки. Формула для расчета показателя спада:

$$n = \left( \frac{U_{\text{дифф}}(r)}{K_{21}U(r)} + 0.015 \right) r/10;$$

Здесь  $r$  измеряется в миллиметрах. На рисунке 22 приведены графики зависимости  $n(r)$ : 1 – результаты измерения одиночной катушкой; 2 – дифференциальным датчиком с учетом поправки; 3 – дифференциальным датчиком без учета поправки. Видно, что даже с учетом поправки дифференциальный датчик дает заниженную величину показателя спада.

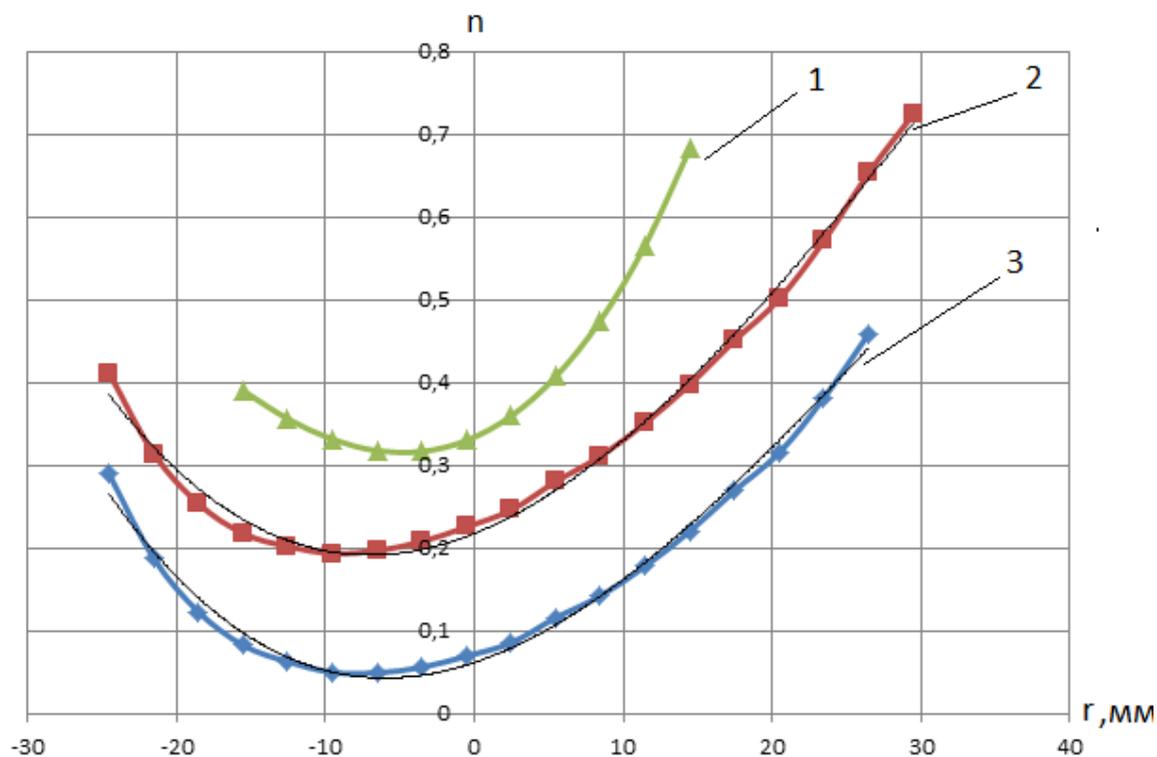


Рисунок 23 – Результаты расчета  $n(r)$  по данным дифференциального датчика

Известно [5], что компенсация погрешности измерений связанной с не идентичностью катушек дифференциального датчика достигается разворотом датчика на  $180^\circ$ , повторным измерением и суммированием результатов. Разработанное нами устройство позиционирования не позволяет провести такое измерение.

### 2.3.3 Измерение азимутальной асимметрии магнитного поля

Для измерения вариации магнитного поля по азимуту был разработан дифференциальный индукционный датчик с расположением двух катушек на одном радиусе и разведенных по азимуту на 10,2 мм. Накладное кольцо устройства позиционирования было размечено с шагом 5 градусов, что в итоге дает 72 экспериментальные точки. Оно было размечено с

помощью делительной головки. Измерения проводились в средней плоскости электромагнита на трех радиусах:  $r_1=91\text{мм}$ ,  $r_2=111\text{ мм}$  и  $r_3=131\text{мм}$ .

Измерения проводились с применением усилителя–интегратора с коэффициентом усиления 40. В каждой точке осуществлялся реверс датчика компенсирующий влияние погрешности изготовления катушек датчика. Сигнал датчика фактически является производной напряжения одиночной катушки по азимуту, поэтому проводилось численное интегрирование по азимуту и вычитание среднего. Затем результат делился на амплитуду сигнала одиночной катушки, измеренного на данном радиусе. На рисунке 24

1– результат измерения вариации магнитного поля по азимуту на радиусе орбиты.

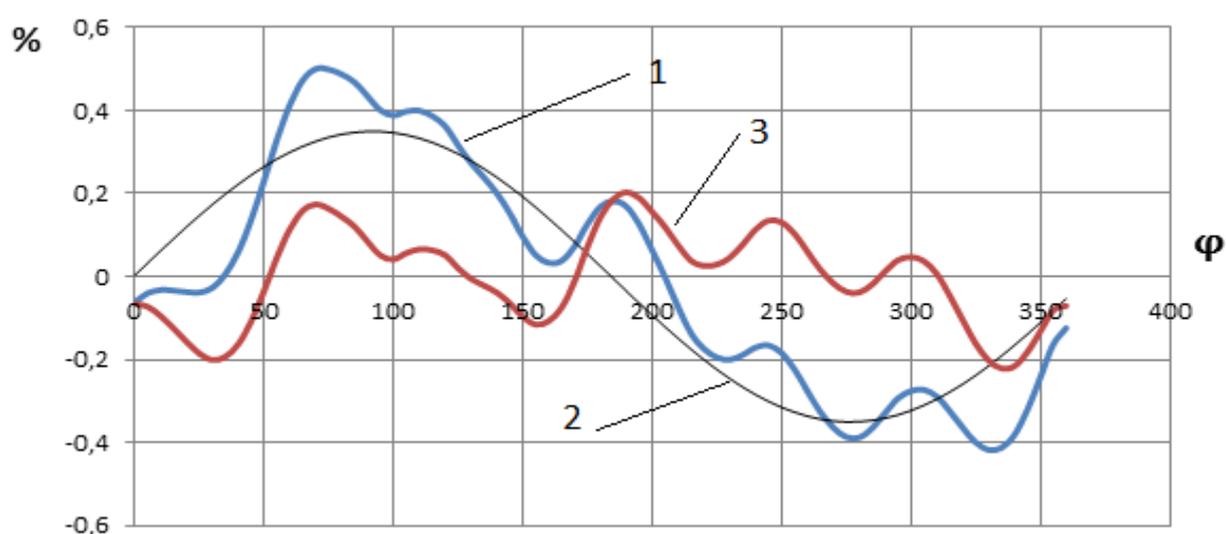


Рисунок 24 – График азимутальной вариации магнитного поля на равновесной орбите:1– обработанный сигнал; 2 – вариация, связанная с биением радиуса; 3 – разность обработанного сигнала и вариации.

Видно наличие первой гармоники азимутальной вариации. В правильно собранном шестизаходном электромагните следует ожидать наличие шестой гармоники, что подтверждается результатами расчетов, приведенными на рисунке 7. Первая гармоника может возникнуть, например,

при перекосе полюсов электромагнита или смещении полюсов относительно друг друга и т.п.

При тщательной проверке геометрии выяснилось, что данная вариация связана с дефектом устройства позиционирования измерительного датчика. При повороте его на  $180^\circ$  радиус положения датчика изменялся на  $\pm 1$  мм. Черной линией на рисунке 24 показана вариация поля связанная с биением положения измерительных катушек. Красная линия результат измерения за вычетом поправки связанной с биением датчика. На рисунках 25 и 26 приведены результаты аналогичных измерений проведенных на радиусе 131 мм и 91 мм соответственно.

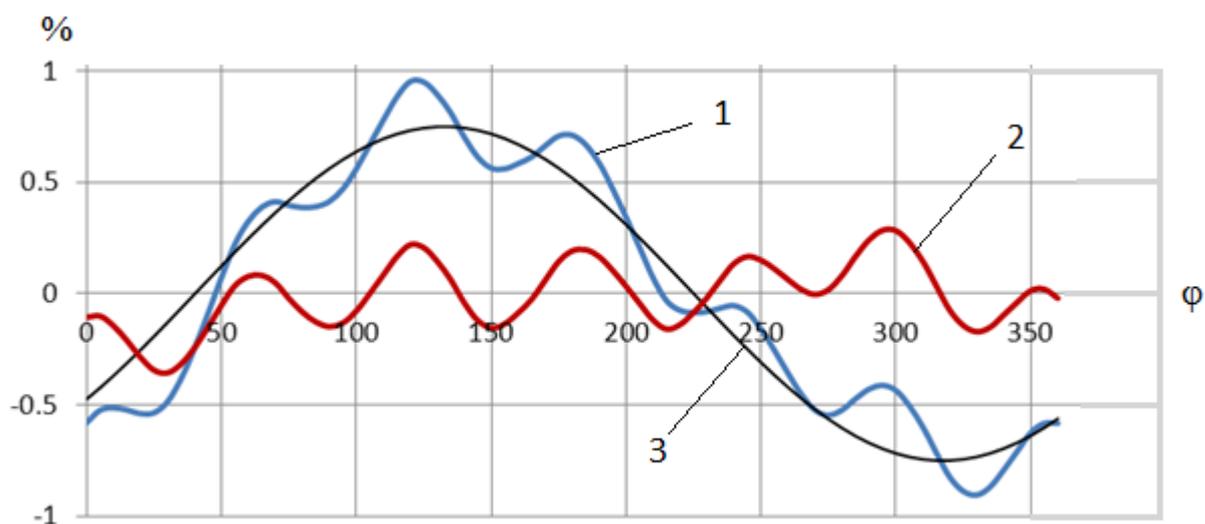


Рисунок 25 – График азимутальной вариации магнитного поля на  $r=131$  мм: 1– обработанный сигнал; 2 – вариация, связанная с биением радиуса; 3 – разность обработанного сигнала и вариации.

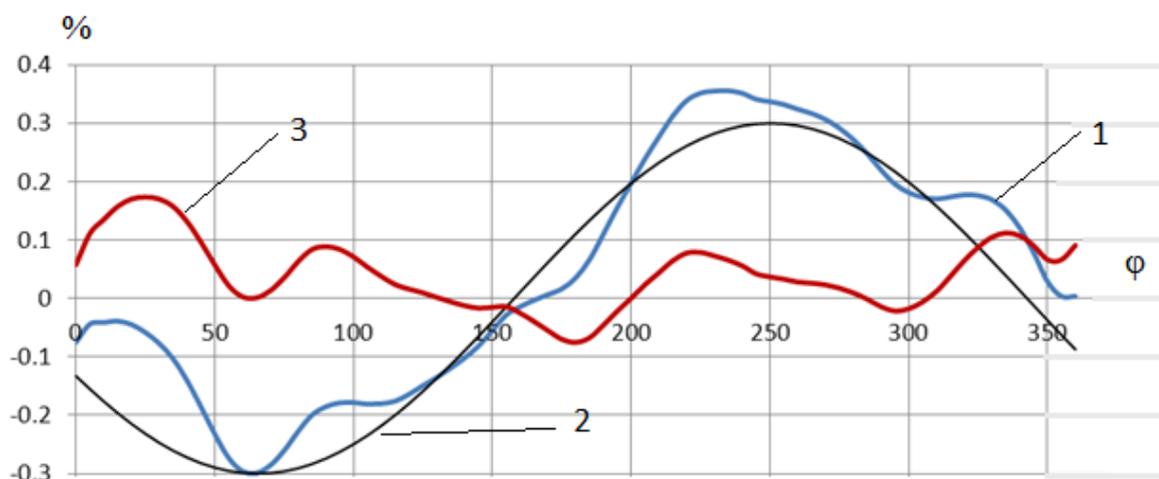


Рисунок 26 – График азимутальной вариации магнитного поля на  $r=91\text{мм}$ : 1– обработанный сигнал; 2 – вариация, связанная с биением радиуса; 3 – разность обработанного сигнала и вариации.

В результате видно, что вариация магнитной индукции по азимуту не превышает  $\pm 0,25\%$  и основной составляющей ее является шестая гармоника.

### 2.3.4 Измерение локального возмущения магнитной индукции бетатрона устройством ввода инжектора

В высокоточных безжелезных бетатронах типа БИМ реализуется мегавольтовая инжекция, при которой предварительно ускоренные электроны впрыскиваются в ускорительную камеру с помощью устройства ввода. Это устройство представляет собой толстостенную медную трубу, заканчивающуюся коническим профилированным участком. Эта труба экранирует внутреннюю часть канала от магнитного поля бетатрона и является металлическим предметом наиболее близко расположенным к орбите. Канал снабжен специальным профилированным экраном, который минимизирует его влияние на магнитное поле бетатрона, однако искажение структуры магнитного поля есть и его измерение является одной из задач данной работы.

Для проведения измерений был изготовлен макет устройства ввода. Он располагался в фиксированном месте с центром вводного отверстия на радиусе 165 мм. Измерения проводились датчиком с одинарной измерительной катушкой.

В эксперименте, индукционный датчик размещался на азимуте вводного устройства на четырех разных расстояниях от центра электромагнита: 117мм, 127мм, 137мм и 147мм. В каждой точке регистрировалась амплитуда импульса напряжения канала регистрации с внесенным в область электромагнита устройством ввода и без него. Каждая серия повторялась не менее трех раз. На рисунке 27 приведена зависимость величины возмущения  $\Delta U/U$  от расстояния оси датчика от оси канала.

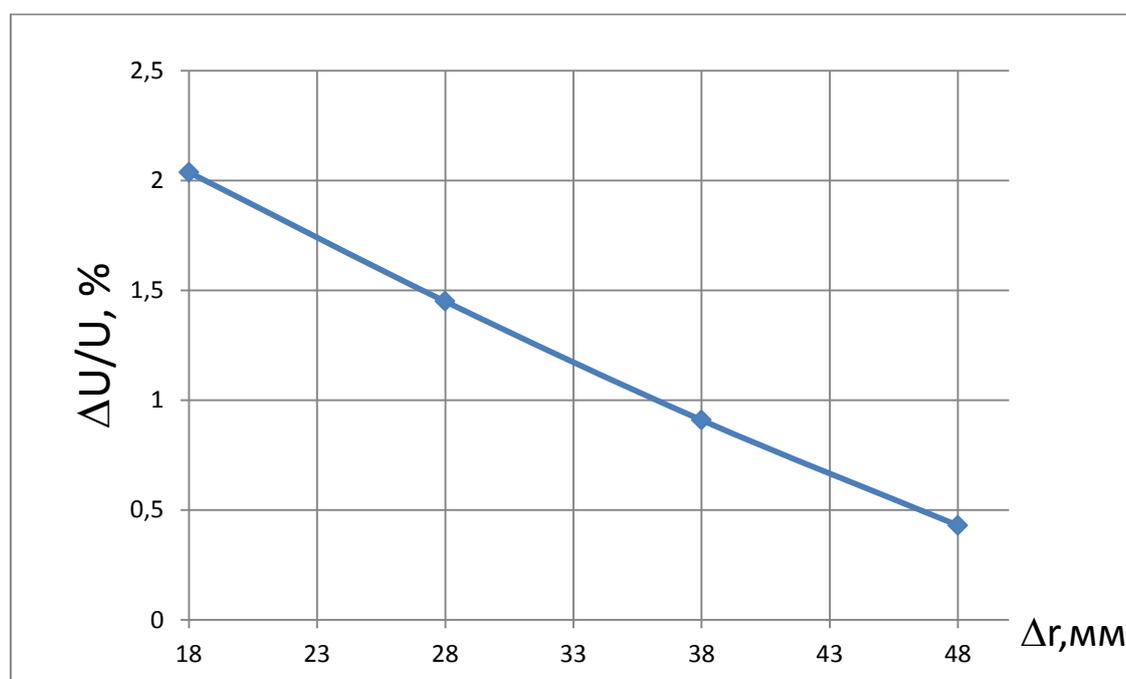


Рисунок 27 – Кривая зависимости величины возмущения от расстояния оси датчика от оси канала

Это возмущение уменьшается с расстоянием от канала и на радиусе орбиты достигает 0,4%. Ранее было выполнено численное моделирование возмущения структуры магнитного поля бетатрона устройством ввода

инжектора [14]. Полученные здесь экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами численного моделирования.

## Заключение

В результате проведенной работы создан экспериментальный стенд для измерения структуры магнитного поля электромагнита безжелезного бетатрона. В состав стенда вошли: генератор импульсов тока, устройство запуска, электромагнит бетатрона БИМ117М, калибровочная катушка, набор индукционных датчиков, устройство позиционирования датчиков, интеграторы сигналов и цифровой осциллографический регистратор TDS2014. Основные дорогостоящие узлы были заимствованы из различных установок и приспособлены для обеспечения проведения измерений.

Специально были разработаны и изготовлены система индукционных датчиков, образованных цилиндрическими однослойными катушками, и устройство позиционирования датчиков, кабельная обвязка электромагнита, система измерительных и пусковых кабелей, измерительное сопротивление – датчик тока электромагнита. Устройство позиционирования обеспечивает перемещение индукционного датчика, смонтированного на линейке, в средней плоскости электромагнита, по радиусу в пределах 0 – 200 мм и по азимуту в пределах 0 – 360°.

Проведена калибровка индукционных датчиков в катушке с однородным магнитным полем, при питании ее от генератора импульсов тока электромагнита. По результатам измерений  $NS_{\text{изм}}=0.0014 \text{ м}^2$ . Отношение  $NS_{\text{изм}}/NS_{\text{геом}}=1,17$ , расхождение около 17%. Измеренная индуктивность датчика равна 12,27 мкГн. Разница в эффективных площадях катушек дифференциального датчика составила 1,5% от площади одиночной катушки.

Калибровка позволила оценить абсолютную величину магнитной индукции на радиусе равновесной орбиты.

Проведено измерение линейности двух измерительных каналов, один из которых, с большим коэффициентом усиления, предназначен для регистрации сигнала дифференциальных датчиков. Отношение коэффициентов усиления двух интеграторов  $K_{21}=42,2$ .

Амплитуда напряжения на выходе измерительных каналов линейно связана с амплитудой импульса магнитной индукции в точке наблюдения.

Проведено четыре серии измерений одиночной катушкой зависимости магнитной индукции от радиуса. В каждой серии датчик перемещался с шагом 3 мм, при точности позиционирования 0,1 мм. В каждой точке результаты усреднялись по трем импульсам. Повторяемость амплитуды тока электромагнита от импульса к импульсу контролировалась каналом с опорной катушкой. Разброс не превышал 1% и учитывался при обработке результатов измерений.

Проведено три серии измерений градиента магнитной индукции по радиусу с помощью дифференциального датчика. В каждой серии датчик перемещался в диапазоне от 70 мм до 160 мм с шагом 3 мм, при точности позиционирования 0,1 мм.

Проведены измерения градиента магнитной индукции по азимуту, в пределах от 0 до 360 градусов, с помощью дифференциального датчика, на радиусах 91 мм, 111 мм и 131 мм. Шаг позиционирования датчиков равнялся 5 градусов.

Изготовлен макет выводного устройства инжектора и проведено измерение возмущения структуры магнитного поля бетатрона в зоне расположения устройства. Величина возмущения на радиусе равновесной орбиты составила 0,4%.

Обработка результатов основных измерений проводилась в пакете Excel.

Она включала в себя усреднение результатов по серии импульсов, введение корректирующих поправок, аппроксимацию массивов данных полиномами и вычисление параметров, характеризующих электромагнит бетатрона.

Было выполнено численное интегрирование зависимости  $B_z(r)$ , рассчитана зависимость  $\overline{B_z(r)}$  и с помощью аппроксимации полиномами  $B_z(r-R_0)$ , и  $\overline{B_z(r-R_0)}$  найдено положение равновесной орбиты  $R_0=111,5$  мм.

С помощью разложения  $B_z(x=(r-R_0))$ , вычислена величина показателя спада магнитного поля на равновесном радиусе  $n_0=0,375\pm 0,02$ .

Обработка данных, полученных с помощью дифференциального датчика, привела к результатам, существенно отличающимся от полученных одиночной катушкой и в расчете. Поправка, связанная с разной эффективной площадью катушек, не полностью компенсировала это расхождение. Проанализированы возможные причины и намечены пути усовершенствования дифференциального датчика. Во первых необходимо изменить конструкцию так, чтобы можно было переворачивать катушки на  $180^\circ$  по радиусу, во вторых увеличить точность изготовления катушек и увеличить амплитуду разностного сигнала (увеличить NS и расстояние между катушками). В имеющемся датчике сигнал слишком мал и заметны его фазовые искажения.

Проведено численное интегрирование сигнала градиента магнитной индукции по азимуту. Найдена зависимость вариации магнитного поля от азимута. Эта вариация является суперпозицией первой и шестой гармоники с амплитудой, не превышающей 0,6% от среднего поля на данном радиусе. Выявилось, что первая гармоника возникает из-за биения по радиусу

на  $\pm 1$  мм устройства позиционирования индукционного датчика при его вращении. Рассчитана соответствующая поправка и получена величина вариации, связанной с конструкцией обмотки электромагнита. Ее величина не превышает  $\pm 0,2\%$ .

Проведено сравнение всех найденных величин и зависимостей с результатами расчетов для электромагнита БИМ117М. Получено хорошее соответствие расчетных величин и результатов измерений.

В заключении считаю необходимым поблагодарить работников НТЦФ, в частности выделить молодого специалиста Савченко К.В. за помощь, оказанную при подготовке и проведении экспериментов.

Необходимо так же отметить большой вклад сотрудника НТЦФ Куропаткина Юрия Петровича, в теоретическую и практическую подготовку автора во время дипломной практики, за что ему выражается отдельная благодарность. Куропаткин Ю.П. является ведущим специалистом РФЯЦ–ВНИИЭФ в области безжелезных бетатронов. Все работы проводились при постоянной консультации с ним и его непосредственном участии.

## Список литературы

1. А.И.Павловский, Г.Д.Кулешов, Ю.А.Зысин, А.И.Герасимов // Доклады Акад. Наук СССР. Т.160. 1. С68. (1965).
2. Герасимов А.И., Куропаткин Ю.П., Тарасов А.Д. Безжелезные бетатроны–генераторы // Атом. – 1996. – №2. – С. 32–37
3. Электромагнит безжелезного бетатрона: Описание изобретения к патенту / исполн. Д.И. Зенков, Ю.П. Куропаткин; Бюл. № 23. – 20.08.2010. – 7с.
4. Ананьев Л.М., Воробьев А.А., Горбунов В.И. Индукционный ускоритель электронов– Бетатрон. – М.: Госатомиздат, 1961. – 346с.
5. Воробьев А.А., Кононов Б.А., Евстигнеев Б.А. Электронные пучки бетатронов. – М.: Атомиздат, 1974. – 152 с.
6. Коломенский А.А. Физические основы методов ускорения заряженных частиц. – М.: Изд–во Моск. Ун–та, 1980. – 302с.
7. Коломенский А.А., Лебедев А.Н. Теория циклических ускорителей. – М.: Изд–во физ.– мат. Лит., 1962. –350с.
8. Методика проектирования электромагнита безжелезного бетатрона: Отчет о НИР / исполн. В.Н. Суворов, Ю.П. Куропаткин; Инв. №4/6452. – 1986. – 56с.
9. Г. Брук Циклические ускорители заряженных частиц. М. Атомиздат, 1970.

10. А.И. Павловский, Г.Д. Кулешов. Гаммаграфическая установка БИМ–234Г для исследования быстропротекающих процессов. Отчёт о НИР / ВНИИЭФ, 1965.

11. Yu.P. Kuropatkin, V.D. Mironenko, V.N. Suvorov, et al. Uncored betatron BIM–M a source of Bremsstrahlung for flash radiography. Proceeding of the 11<sup>th</sup> IEEE International Pulsed Power Conference, Baltimor, 1997, p.1669...1673.

12. Yu.P. Kuropatkin, V.D. Mironenko, V.N. Suvorov, A.A. Volkov. Characteristics of the installation for flash radiography based on the uncored betatron BIM–M. Proceeding of the 11<sup>th</sup> IEEE International Pulsed Power Conference, Baltimor, 1997, p.1663...1668.

13. А.И. Павловский, В.Н. Суворов, Ю.П. Куропаткин. Методика проектирования электромагнита безжелезного бетатрона. Отчёт о НИР / ВНИИЭФ, 1986.

14. ГОСТ 12.0.003–74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: Издательство стандартов, 2004. – 4 с.

15. ГОСТ 12.1.005–88. Общие санитарно–гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – М.: Стандартинформ, 2005. – 10 с.

16. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.

17. ГОСТ 12.1.003–8. Шум. Общие требования безопасности. – М.: Издательство стандартов, 2004. – 13 с.

18. ГОСТ 12.1.029–80. Средства и методы защиты от шума, 1980. – 4 с.

19. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений

20. СанПиН 2.2.2/2.4 1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. М.: Госкомсанэпиднадзор, 2003.

21. ГОСТ 12.2.062-81. Оборудование производственное. Ограждения защитные. – М.: Стандартинформ, 2008. – 4 с.

22. ПБ10-115-96. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. – ПИО ОБТ, 1996.

23. ГОСТ 12.2.085-82. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. – М.: Стандартинформ, 2007. – 15 с.

24. ГОСТ 12.1.019-79 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. – М.: Стандартинформ, 2000. – 7 с.

## Приложение А

### Measuring betatron's magnetic field inhomogeneity

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ41	Чинин А.А.		

Консультант кафедры ЭФ \_\_\_\_\_:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Блейхер Г.А.	д.ф-м.н.		

Консультант – лингвист кафедры ИЯФТ :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Ермакова Я.В.			

## Introduction

Pulsed x-ray shadow is one of the main means of obtaining information about the dynamics of bodies in explosive experiments. The quality of information is determined by the characteristics of the radiation source and, firstly, its intensity. One of the radiation sources for pulsed x-rays are special x-ray machines, in which the pre-accelerated electrons are slowed in the target, generating bremsstrahlung. The intensity of such a source is proportional to the number of electrons impinging on the target, and is growing rapidly with increasing electron energy. The most powerful sources are based on electron accelerators, where they are accelerated to tens of MeV.

In VNIIEF, created for this purpose, there is used an improved betatron installation class incorporeal-pulse – small (IPS). They're a compact circular accelerators in which a beam of electrons, generated in a special device – the injector – is held in a stationary orbit due to the special spatial distribution of the magnetic field and accelerating vortex's electric field generated by changes in magnetic flux through the area covered by the orbit. In order to create the required spatial distribution of the magnetic field and providing high rate acceleration of multistart there are used incorporial electromagnets. This design allows the electromagnet to generate a magnetic field betatron with good azimuthal

symmetry. However, in a magnetic field it can arise heterogeneity of different nature, which may harmfully influence the dynamics of the beam during the acceleration process. In particular, in regards to a powerful radiation source, in the betatron BEAM is used megavolt injection in which the injected beam is introduced into the chamber of the betatron with the aid of the input device which is a metal channel placed in the magnetic field of the betatron and, of course, affect the structure of the magnetic field near it.

The following work was performed with the aim of measuring the main characteristics of the electromagnet of the betatron, the identification of correspondence between the estimated characteristics of the distribution of magnetic fields formed by the windings of the electromagnet of the betatron pulse incorporal and distribution of this field already manufactured and assembled on the basis of the calculation of the form factor. Despite the fact that the installation on the basis of the studied electromagnet may take many years in operation, and the parameters of the output beam are reproduced on different systems, this study is of interest to assess the accuracy of the Assembly and detection of magnetic field distortion insertion located in the vicinity of the electromagnet with metallic parts of functional units. In addition, there are a number of effects such as proximity effect currents, skin effect and others, which can lead to a change in the geometry of the magnetic field in time. Especially important is the knowledge of the structure of the magnetic field at the time of injection and initial stages of acceleration. It is supposed to measure on two totally different frequencies by incorporating 12-coils and forming an electromagnet in series – the first series of measurements in parallel with the second series of measurements. Comparison of results will allow to evaluate the dynamic effects and, possibly, to identify ways of improving the electromagnet of the accelerator. This work is devoted to the development of the

testbed and the realization of the first part of the measurements – measurements with a serial connection of the coils forming the electromagnet.

To implement the former formulated objectives we should take special attention to:

1. The basis of output parameters of the existing power system and using the settlement data of the electromagnet, to estimate the generated magnetic field and induction to develop miniature sensors that provide an acceptable level of the measured signal.

2. Developing a system design measurements that allows to position the sensors in every point of the plane of symmetry of the electromagnet.

3. Measuring the magnetic field distribution along the radius of the solenoid in serial connection of the coils of the electromagnet.

4. Regard data obtained to calculate the position of the equilibrium orbit; the distribution of the rate of decay radius.

5. Measuring the magnetic field distribution in azimuth on the equilibrium orbit in the free magnet, and also with the introduction of the conductive object, simulating an input device of the injector.

6. The data obtained to estimate the azimuthal heterogeneity of the magnetic field in free electromagnet, as well as local outrage when changes in the magnetic field of the conductive object occur, simulating an input device of the injector.

### **Description of principles of operation of betatron installation**

The betatron is one of the first cyclic accelerators of charged particles. In it, a beam of electrons moving in a stationary circular orbit is accelerating a vortex electric field excited by the alternating magnetic flux. The stability of the particle in orbit is provided by the spatial distribution of the magnetic field: it should slowly subside along the radius.

Small deviations of the electron orbits arise from the restoring force, the magnitude of which is proportional to the deviation. The movement in such a force field is oscillatory in nature. In circular accelerators these oscillations are called betatron oscillations. Figure 1 shows a design sketch of a betatron. The electrons move close to the equilibrium orbit, fluctuating within the zone of stability 1.

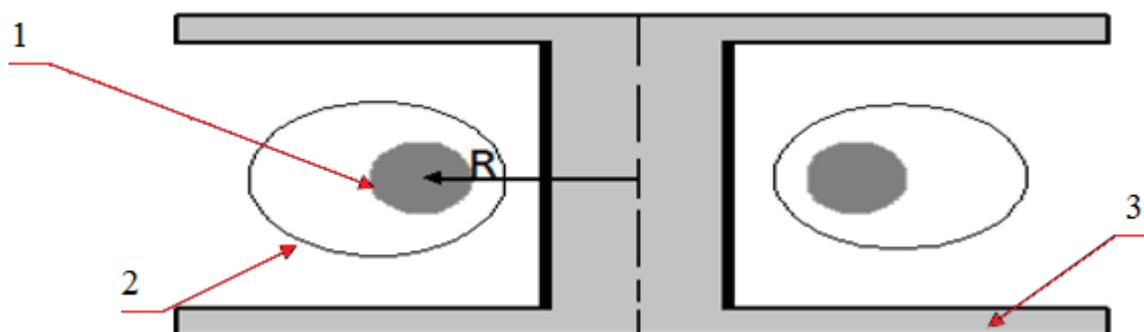


Figure 1 – Sketch of the structure of the betatron:

1 – the stability region of the electromagnet, 2 – walls of the accelerator chamber, 3 – the case of the coil of the electromagnet.

The stationarity of the orbit (with simultaneous change of the leading magnetic field in orbit  $B(R_0)$  and the magnetic flux penetrating the orbit, is the so-called «condition 2:1»

$$\overline{B(R_0)} = 2B(R_0)$$

According to which, the magnetic induction on the equilibrium orbit must be two times less than the average value of magnetic induction in the circle of the radius  $R_0$ . The variation on the rate of energy of an electron moving on the orbit automatically is consistent with the rate of the rise of the magnetic induction on the orbit. Any particle with energy  $E$  meets in its orbit is a circle, where the balance of forces are acting upon it. The energy of the particle at any time of the acceleration cycle is associated with the relation:  $E \approx 300BR$ , the radius of the orbit  $R=R_0$ , incorporeal in the betatron, is rigidly connected with the geometry of the electromagnet, and the magnetic induction  $B$  is proportional to the current in the winding, which typically varies by sine law. It is also important that for electrons

moving in an orbit with a radius less than the equilibrium, the rate of increase of energy exceeds the rate of field growth as the orbit and the radius increases, approaching the equilibrium. Electrons moving at radii greater than the equilibrium set of energy lag behind the growth rate of the magnetic induction and the orbit is reduced, also approaching equilibrium.

### **Description of the experimental installation**

Installation for measurement of the structure of the magnetic field of the betatron consists of the following components:

- a pulsed power source;
- the electromagnet;
- measuring sensors and positioning device;
- two of the integrator;
- oscilloscope TDS-2014;
- device the remote start.

Figure 8 shows the block diagram of the measuring bench.

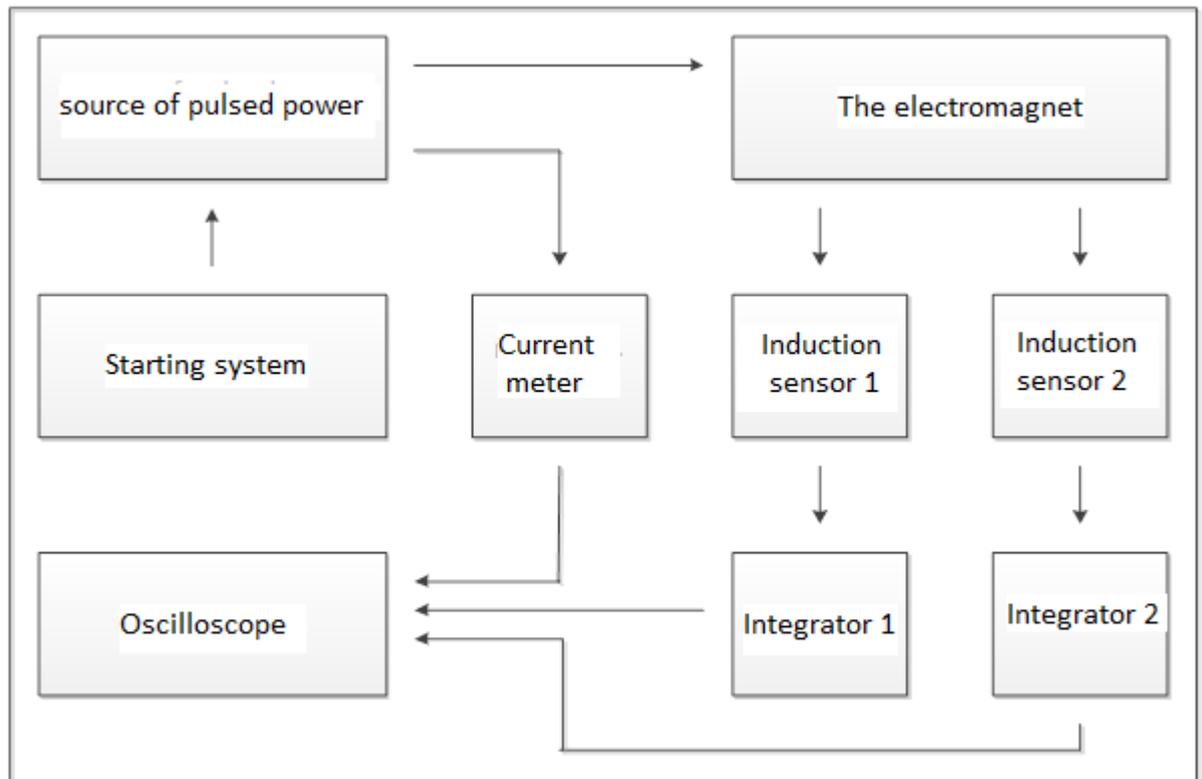


Figure 8 – Block diagram of the experimental installation

As source of pulsed power has been used one of the functional units of betatron installation BIM 234.3000, providing the formation in the electromagnet current pulse amplitude of the order of 100 A. The discharge circuit included measures the resistance  $R=0.15$  Ohm, for measuring the shape of the current. The main induction sensor was fixed in the positioning device, mounted on the Central solenoid of the electromagnet. The second sensor was used as a comparison signal. It was fixed in the median plane of the electromagnet on an assumed radius of the equilibrium orbit. Integrators used nodes developed outside this work. Induction sensors were connected to integrators coaxial cables with a length of 2 m. All pulse signals were recorded with four-channel oscilloscope TDS-2014. A source of pulsed power, the integrators and the solenoid was located in the experimental hall. The oscilloscope and the device start-up are located at the control room at a distance of 20 meters from the electromagnet. The signals transmitted through coaxial cables

RK-50-6. To reduce electromagnetic interference, the oscilloscope was fed from a UPS, but in the main measuring channel including a high pass filter.

Measurement of the magnetic induction along the radius with a single coil to measure the relationship  $B(r)$  used a line-sensor (see figure 14), which moved from the center to the edge of the solenoid with a step of 3 mm, was removed in 66 experimental points. Since  $B(r)$  proportional to  $U(r)$  is the coil voltage, and we are interested in the relative dependence, everywhere in the future will be considered  $U(r)$ . In each experiment the source of pulsed power is charged to a voltage  $V=3$  kV. Changing the position of the measuring coil relative to the center of the electromagnet, we have measured the induced voltage in it at this point. The signal was recorded by oscilloscope TDS-2014. The amplitude of each signal was entered into an Excel spreadsheet, where further processing was conducted.

In the first column of Table 1, the number of the experiment, the following distance inductive sensor from the center of the electromagnet. In the following two, it provides indications of the amplitude of the forward signal deployed on an  $180^\circ$  axis direction of the coil relative to the axis of the magnet. At each point the pulses were repeated at least three times. Next is the average value of the data obtained in each experimental point. To find the equilibrium orbit, it is necessary to build a curve according to  $U_{sr}(r)/2$  which, due to the ratio of 2:1 intersects  $U(r)$  near the equilibrium orbit. The data obtained was the dependence  $U(r)$  (red solid line in figure 19).

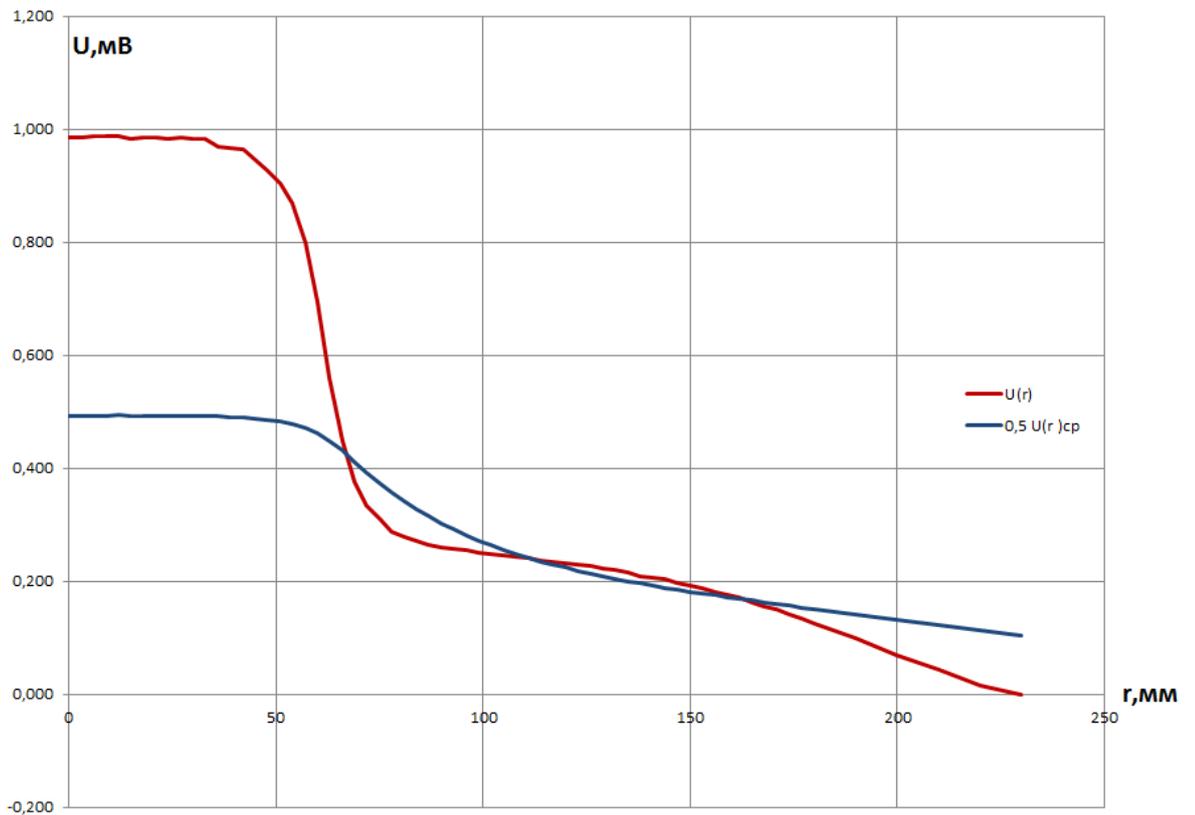


Figure 19 – Graphs of the dependences  $U(r)$  and  $0.5 U_{av}(r)$

Figure 19 also shows the dependence  $0.5 U_{av}(r)$  (blue solid line), which is necessary for finding the radius of the equilibrium orbit.

The average value of the magnetic field of HRV(r) in the range of the equilibrium orbit is equal to:

$$B_{av} = \frac{\Phi_0}{2\pi r_0^2} = \frac{1}{2\pi r_0^2} \int_0^{r_0} B(r) 2\pi r_0 dr = \frac{1}{r_0^2} \int_0^{r_0} B(r) r_0 dr$$

In order to build a curve based on  $0.5 U_{av}(r)$  it was needed to calculate the integral  $\frac{1}{r_0^2} \int_0^{r_0} U(r) r_0 dr$ . To do this, we calculated the area under the curve  $U(r)$ , by dividing it into rectangles with the same base – that equals 3 mm. – and the resulting data was multiplied by the quantity  $\frac{1}{r_0^2}$  and then was divided into two, to complete the ratio of 2:1. As the graph shows, the equilibrium orbit is at a distance of 111–112 mm from the center of the electromagnet.

For calculating the accurate location of the position of the equilibrium orbit, it was taken a cut of the 20 points closer to the intersection of the graphs of the functions  $U(r)$  and  $U(r)/2$  achieving then, approximate values of each experimental curve polynomials after it was treated with Excel. As the independent variable  $X$  was chosen, the difference between the current coordinate  $r$  and the intended radius of the equilibrium orbit  $R_0^*$  that is,  $X=r-R_0^*$ . The degree of the polynomial is chosen so that at this period the coefficient of determination  $R^2$  is not lower than 0,99. This was enough for a polynomial of the 3rd degree. By varying the value of  $R_0^*$  we brute force equality free members, equations of curves obtained by approximation. When we got the decomposition of both functions for the deviations from the true equilibrium orbit  $R_0$  the value of  $R_0$  turned out equal to 111,5 mm.

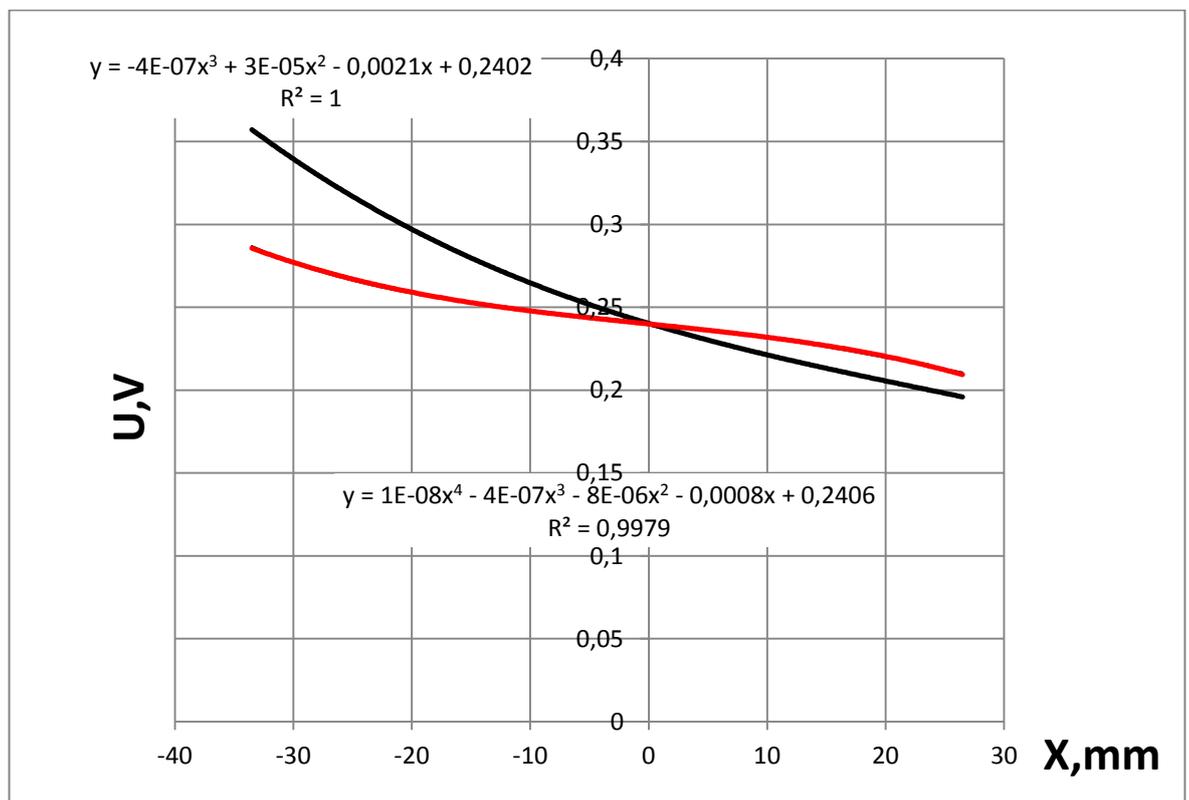


Figure 20 – the Result of approximation of  $U(r)$  and  $(U(r)/2)$  polynomials in a neighborhood of the equilibrium orbit

The estimated radius of the equilibrium orbit for the electromagnet (see Figure 5) is equal to 112 mm. While differentiating the polynomial, approximately

the field of distribution in the vicinity of the equilibrium orbit shown in figure 20, the resulting gradient field shown that the point  $x=0$  we find  $n_0=0,00080/0,240*111,5=0,373$ .

The next step was plotting the dependence of the rate of decay of the radius  $n(r)$ :

$$n = -\frac{\partial B}{\partial r} \frac{r}{B} = -\frac{\partial U}{\partial r} \frac{r}{U}$$

To calculate  $\partial U/\partial r$ , it was used the difference between the signals in two adjacent experimental points, then, the found the change was divided into a permanent step, which in this experiment was 3 mm. The obtained data was multiplied by the radius and divided into the voltage of the signal induction sensor corresponding to the experimental point.

Then there was the approximation of data by a polynomial of 3rd degree for smoothing the curve and calculate its equation. The result is shown in Figure 21.

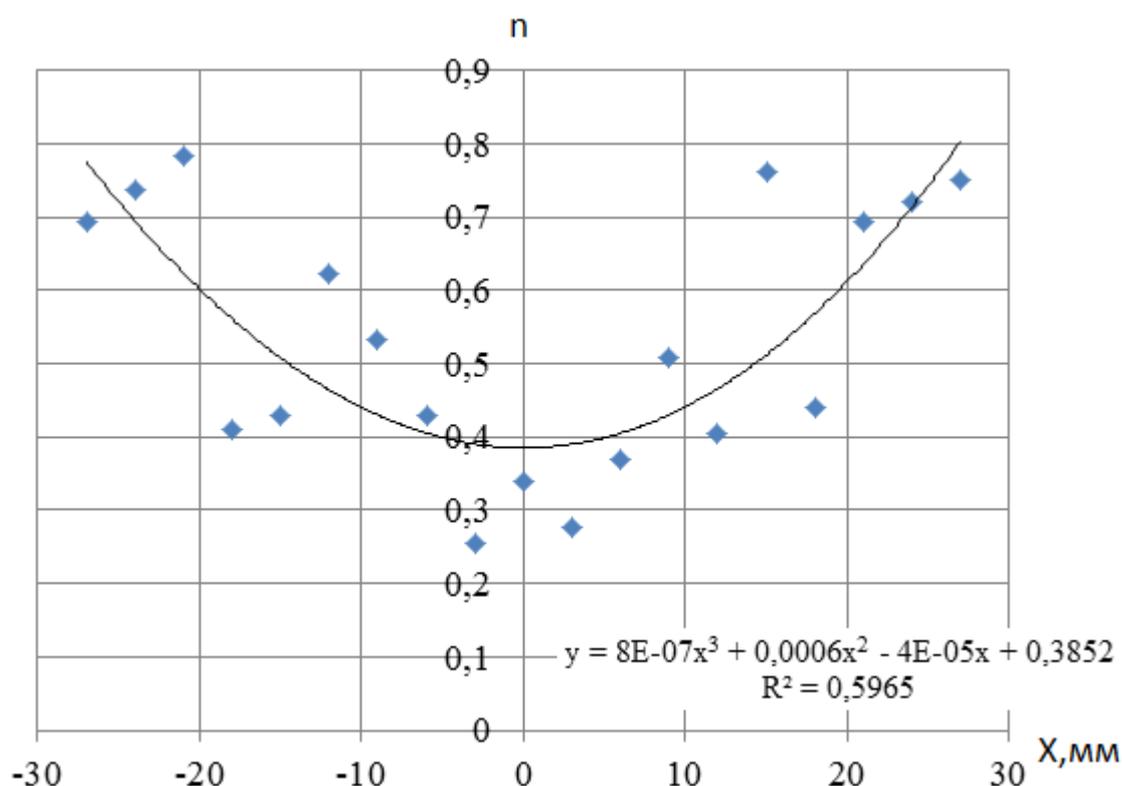


Figure 21 – the calculation Result of the decline in  $n(x=r-R_0)$  for the experimental points

As the graph shows, there is large scatter of experimental points, which cause some doubts regarding the accuracy of obtaining the dependence  $n(r)$ .

The coefficient of reliability of approximation is also not great, however, the value of the rate of decline in the equilibrium radius of the orbit  $n_0=0,385$  is approximately consistent with the calculated value for  $n_0=0.39$  in.

To improve the accuracy of the calculation of the rate of decline, it was decided that should be used the approximated experimental data, which should lead to an increase of accuracy. An array of data  $U(r)$  on the plot

$X=R_0 \pm 40$  mm were approximated by a polynomial by powers of  $x$ , and the degree of the polynomial is chosen so that  $R^2 > 0,995$ . Data after the approximation by the polynomial is shown in Figure 22.

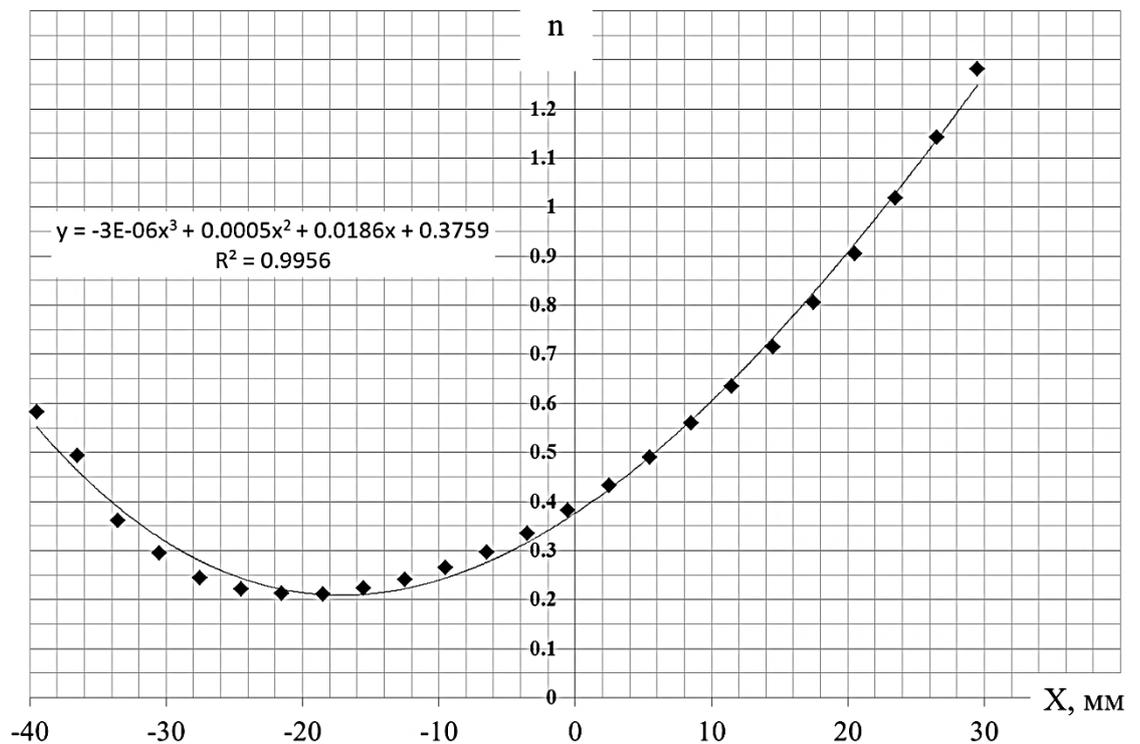


Figure 22 – Graph of  $n(x)$

As can be seen from the equation of the polynomial curve, the equilibrium orbit  $R_0=111,5$  mm, and the rate of decay  $n=0,375$ .

### **Measurement of the rate of decay using differential sensors**

The next step was conducting the measurement of magnetic fields using a differential sensor. Design and results of calibration of the sensors is given in section 2.1.4. The differential signal sensor is proportional to the gradient of the magnetic field. When placing the sensor near the equilibrium orbit, the amplitude of the signal shown was in the order of several millivolts.

The sensor is connected to the amplifier–integrator with a gain of about 20. The calculation of the rate of decay is carried out by dividing the differential signal of the sensor by a signal received from one coil that is connected to another integrator. The ratio of the gains of the two integrators is equal to 42.2. Because of the different NS of the two coils forming a differential sensor, the value of which is determined by calibration in a uniform magnetic field (see section 2.1.4), to calculate the recorded signal  $U_{\text{дифф}}(r)$  you need to add an amendment  $\Delta U(r)=0.015*U(r)$ , where  $U(r)$  is the signal single coil. The formula for calculation of rate of decay is the following:

$$n = \left( \frac{U_{\text{дифф}}(r)}{K_{21}U(r)} + 0.015 \right) r/10;$$

Here  $r$  is measured in millimeters. Figure 22 shows graphs of the dependence  $n(r)$ : the top one shows measures from a single coil; the middle one, from a differential sensor, as amended; and the bottom one, from a differential sensor without any adjustment. It is seen that even with the adjustment of the differential sensor the magnitude of the decline was underestimated.

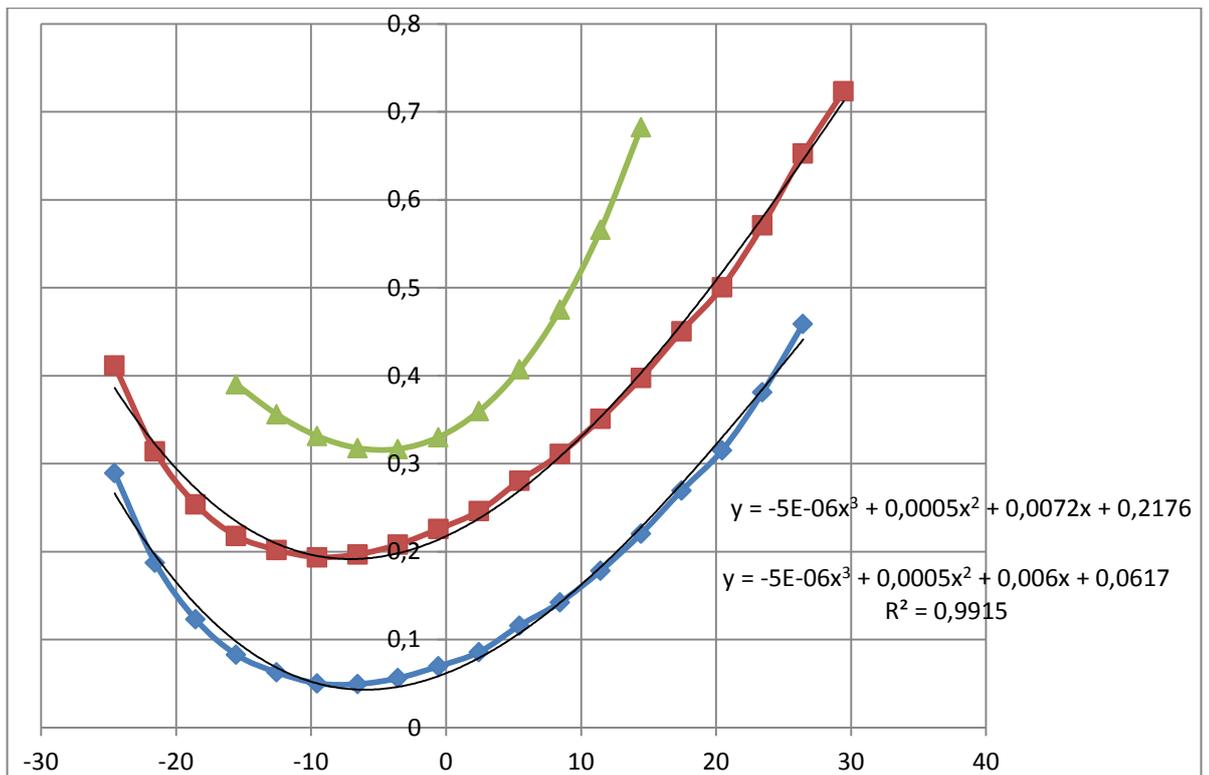


Figure 23 – the Results of the calculation of  $n(r)$  according to the differential sensor

It is known that the compensation of measurement errors associated with the identity of the coils of the differential sensor is achieved by turning the sensor  $180^\circ$ , re-measuring and then summing the results. The developed positioning device does not allow for such measurement.

### Measurement of azimuthal asymmetries of the magnetic field

For measuring variations of a magnetic field on the azimuth it was designed an differential inductive sensor arrangement of two coils on the same radius and separated in azimuth by 10.2 mm. Ring ring positioning device was marked in 5 degree increments, for a total of 72 experimental points. It was marked up with the dividing head. The measurements were carried out in the mid-plane of the solenoid in three radii:  $r_1=91$  mm,  $r_2 =111$  mm, and  $r_3= 131$ mm.

The measurements were carried out with the use of an amplifier-integrator with a gain of 40. In each point was carried out the reverse sensor, which compensates the influence of manufacturing errors of the coils of the sensor. The sensor signal is actually the derivative of the voltage of a single coil in azimuth, therefore, the numerical integration was carried out in azimuth, and then subtracted the average. The result was divided by the amplitude of the signal of a single coil, measured at this radius. In figure 24 the blue line shows the result of measuring the variation of the magnetic field in azimuth on the radius of the orbit

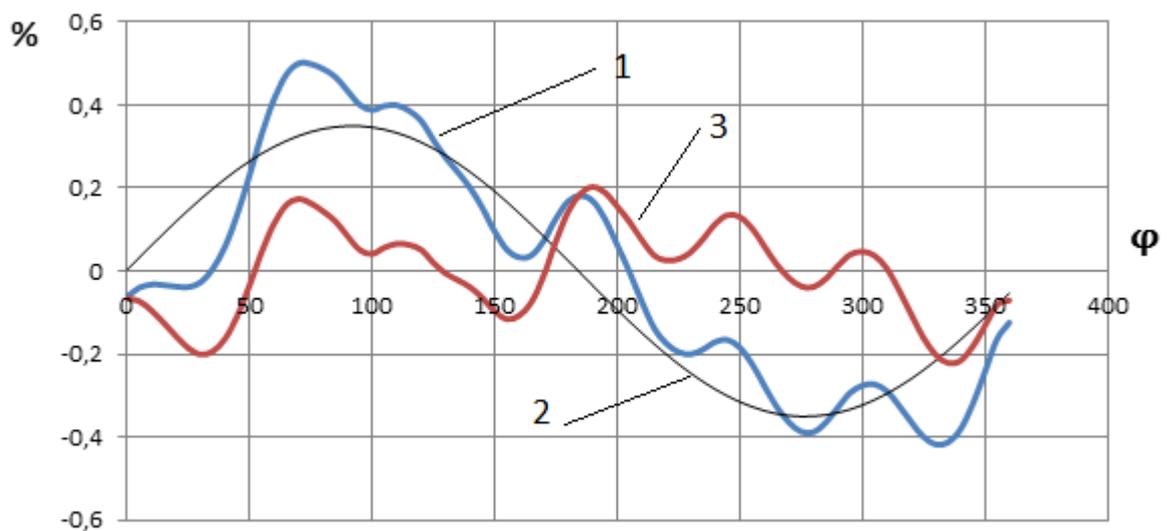


Figure 24 – Graph of the azimuth variation of the magnetic field on the equilibrium orbit: 1 – processed signal; 2 – a variation associated with the beating of the radius; 3 – the difference between the processed signal and variations.

Shows the presence of the first harmonic azimuthal variation. In a properly assembled satisfied not the electromagnet should expect the presence of the sixth harmonic, which is confirmed by the results of the calculations that are shown in Figure 7. The first harmonic may occur, for instance, with the misalignment of the poles of the electromagnet or the displacement of the poles relative to each other, etc.

The thorough geometry analysis revealed that this variation is associated with a defect in the positioning of the measuring sensor. When you turn it on an  $180^\circ$  radius, the probe position varied by  $\pm 1$  mm. The Black line in figure 24 shows the field variation associated with the beating of the position measuring coils. The red line is the measurement result minus the amendments associated with the heartbeat sensor. Figures 25 and 26 show the results of similar measurements conducted for a radius of 131 mm and 91 mm, respectively.

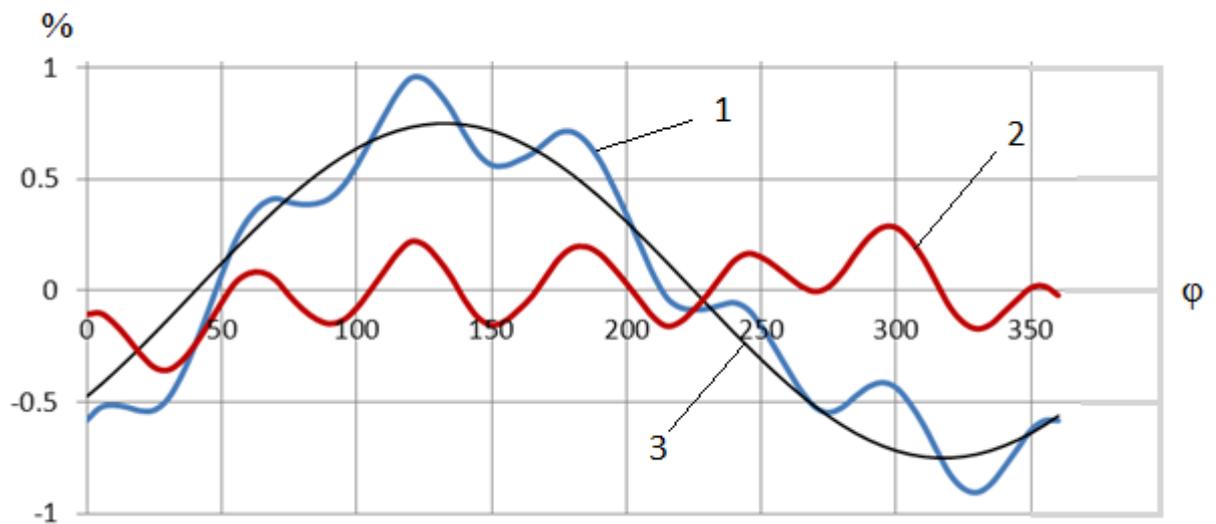


Figure 25 – Graph of the azimuth variation of the magnetic field at  $r=131$ mm: 1 – processed signal; 2 – a variation associated with the beating of the radius; 3 – the difference between the processed signal and variations.

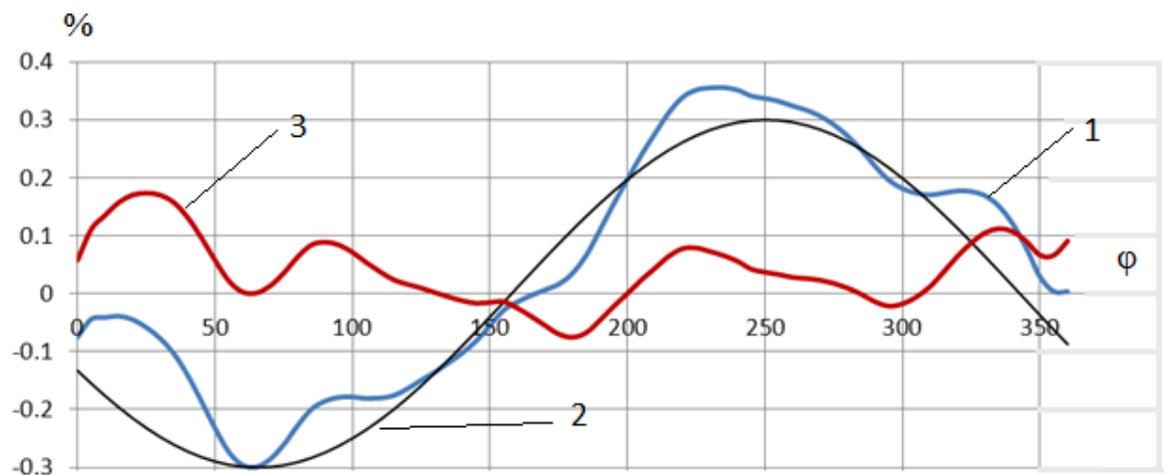


Figure 26 – Graph of the azimuth variation of the magnetic field at  $r=91\text{mm}$ :  
1 – processed signal; 2 – a variation associated with the beating of the radius; 3 –  
the difference between the processed signal and variations.

The result shows that the variation of the magnetic induction in azimuth does not exceed  $\pm 0,25\%$  and its main component is the sixth harmonic.

### **Measuring local perturbations in the magnetic induction betatron input device injector**

In high-current betatrons bezieling type BIM it is implemented a megavolt injection, in which pre-accelerated electrons are injected into the accelerating chamber through the input device. This device is a thick-walled copper pipe, ending in a conical shaped area. This tube shielding the inner part of the channel from the magnetic field of the betatron is the metal object the closest to orbit. The channel is equipped with a special shaped screen, which minimizes its influence on the magnetic field of the betatron, however, the distortion of the structure of the magnetic field remains and its measurement is one of the objectives of this work.

The layout of the input device was made for measurements. It was located in a fixed location with the center of the introductory hole at a radius of 165 mm. the Measurements were carried out with a sensor with a single measuring coil.

In the experiment, an induction sensor was placed on the azimuth of the input device at four different distances from the center of the electromagnet: 117mm, 127mm, 137mm and 147mm. At each point it was not only recorded the amplitude of the voltage pulse of the channel check, but also the area of the electromagnet input device without it. Each series was repeated at least three

times. Figure 27 shows the dependence of the magnitude of the perturbation  $\Delta U/U$  of the axis distances of the sensor from the axis of the channel.

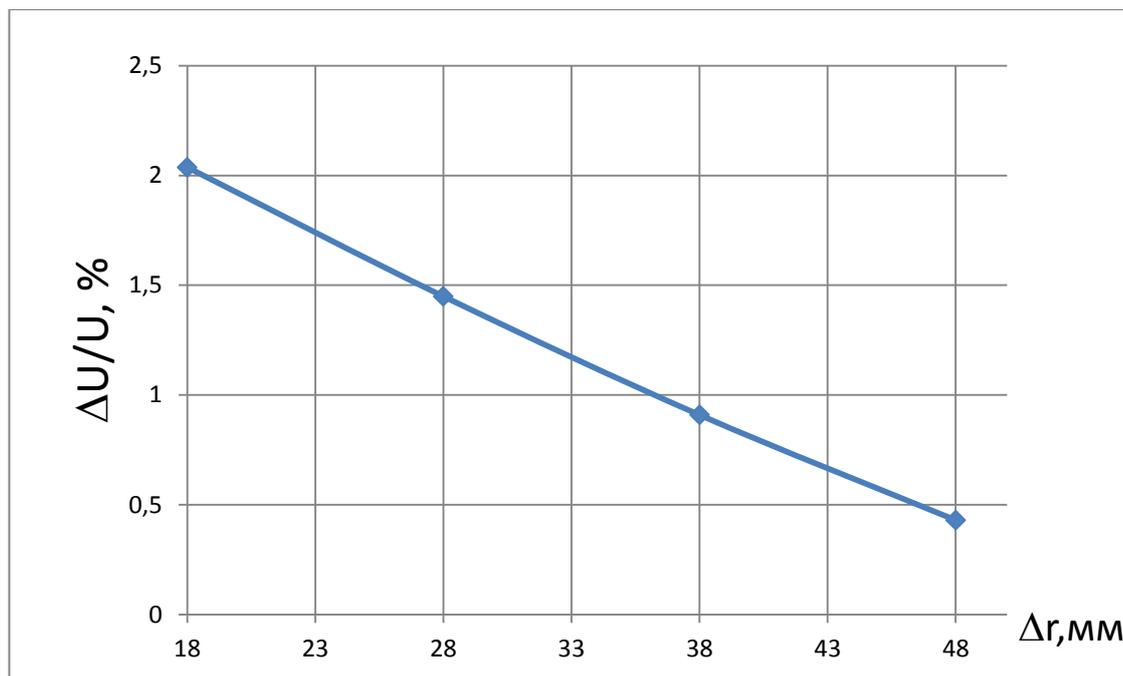


Figure 27 – the Curve of dependence of the perturbations of the axis distance of the sensor from the axis of the channel

This perturbation decreases with distance from the channel and the radius of the orbit up to 0.4%. Modeling of the perturbation of the betatron's magnetic field structure was previously carried out by inputting of the injector [14]. The experimental results are in good agreement with the numerical simulations.