

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Толмачев Кирилл Алексеевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение магнитного поля, наведенного электронным пучком ВЧ
ускорителя ИЛУ-6**

Практикум по электричеству и магнетизму, 2 курс, группа № 18311

Научный руководитель:

Штарклев Е.А.

Оценка научного руководителя

« 06 » _____ декабря _____ 2019 г.

Преподаватель практикума

к.ф.-м.н. Чопорова. Ю. Ю

Оценка преподавателя практикума

« _____ » _____ декабря _____ 2019 г

Оглавление

Аннотация	3
Введение.....	4
Теоретическая часть.....	6
Практическая часть	7
Обработка результатов и выводы.....	13
Список литературы	14
Приложение	15

Аннотация

Целью данной работы является измерение магнитного поля, наводимого пучком электронов импульсного линейного ускорителя ИЛУ-6. Для измерения магнитного поля выбран метод, основанный на измерении ЭДС индукции, которая возбуждается на обмотке катушки. Основываясь на известных параметрах пучка, была проведена оценка параметров для выбора подходящей катушки. Также была выбрана теоретическая модель поставленной задачи, и собрана система, моделирующая магнитное поле электронного пучка, для оценки возможности его реального измерения, а также калибровки сигнала с катушки. После был проведен эксперимент на ускорителе ИЛУ-6. Результаты, полученные в ходе проведения эксперимента, согласуются с построенной теоретической моделью.

Ключевые слова: импульсный линейный ускоритель, ИЛУ-6, электронный пучок, магнитное поле

Введение

Ускорители электронов серии ИЛУ (импульсный линейный ускоритель), производимые в ИЯФ СО РАН, играют важную роль в промышленности, так как они предназначены для применения в различных технологических процессах и рассчитаны на длительную непрерывную и круглосуточную работу в промышленных условиях [2]. Импульсный характер пучка позволяет легко адаптировать ИЛУ к технологическим процессам, требующим создания зоны облучения сложной конфигурации.

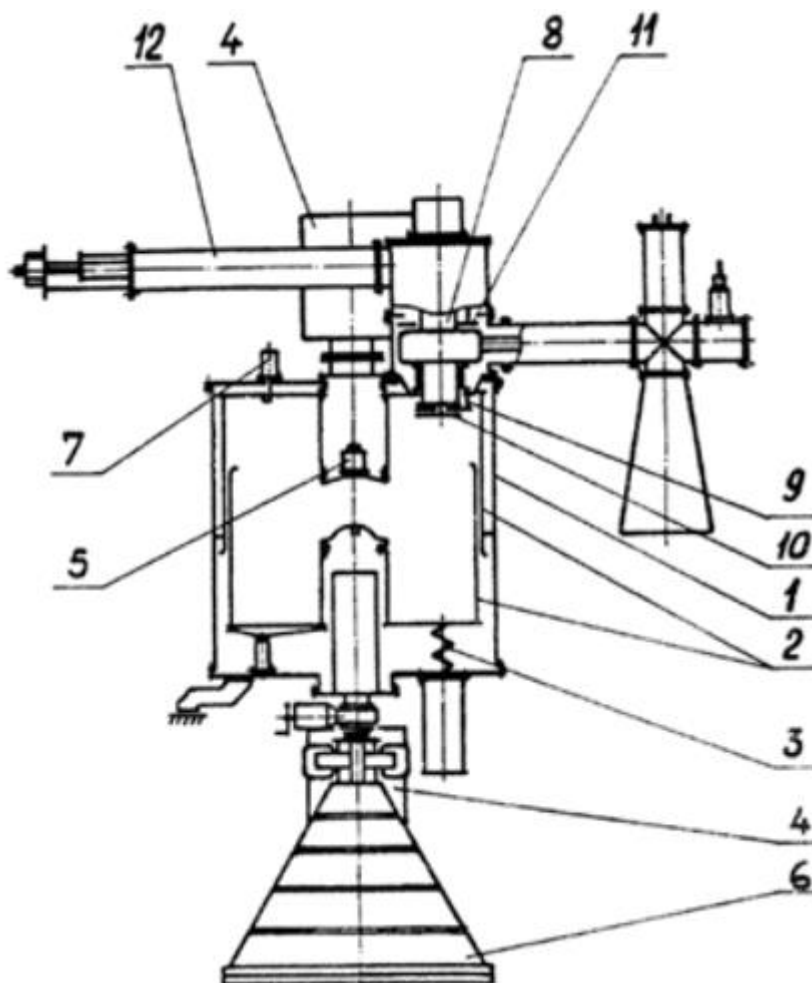


Рис.1 Общий вид ИЛУ-6. 1-вакуумный объем, 2-резонатор, 3-дроссель смещения нижней половины резонатора, 4-магниторазрядные насосы, 5-инжектор электронов, 6-выпускное устройство, 7-измерительная петля, 8-лампа генератора, 9-опора петли связи, 10-вакуумный конденсатор петли связи, 11-подвижная пластина конденсатора обратной связи, 12-катодный шлейф

Данная работа посвящена измерению магнитного поля, наводимого пучком электронов ускорителя ИЛУ-6. Чтобы измерить данное магнитное

поле был выбран метод, основанный на измерении ЭДС индукции, которая возбуждается на обмотке катушки. ЭДС индукции измерялась при помощи осциллографа. Для достижения поставленной задачи была выбрана теоретическая модель, позволяющая оценить параметры подходящей катушки. В качестве теоретической модели была выбрана задача нахождения магнитного поля от прямого тока, упирающегося в металлическую поверхность. Были произведены теоретические расчеты и оценки. Далее была собрана упрощенная реальная модель, позволяющая откалибровать катушку для последующих измерений на ускорителе. В реальной модели магнитное поле, также как и на ускорителе, имело импульсный характер. Для создания импульсного поля была собрана вспомогательная радиосхема.

Теоретическая часть

При решении задачи о проводнике с током, упирающемся в бесконечную проводящую плоскость [1] используется метод изображений, с обратной стороны плоскости ставится изображение в виде такого же проводника с током в противоположном направлении, так как граничные условия выполняются, то по теореме единственности это решение является единственным верным. Получаем, что магнитное поле со стороны упирающегося проводника равно

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{r}, \quad (1)$$

где I - сила тока в проводнике, r - расстояние до центра проводника, μ_0 - магнитная постоянная. ЭДС, наводимая в катушке, равна

$$\varepsilon = -w \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2)$$

где w -количество витков. Поток Φ находится по формуле

$$d\Phi = SdB. \quad (3)$$

Подставим (3) в (2) получим

$$\varepsilon = -w \frac{SdB}{dt}, \quad (4)$$

возьмем магнитное поле (1) и подставим в (4) получим

$$\varepsilon = -w \frac{\mu_0 S 2I}{4\pi r dt}. \quad (5)$$

Выразим из (5) величину

$$wS = - \frac{4\pi \varepsilon r dt}{2I\mu_0} \quad (6)$$

Параметры пучка ускорителя ИЛУ-6: сила тока 325 мА, длительность импульса тока пучка 500 микросекунд. Электронный пучок сканируется вдоль выпускного окна ускорителя длиной 1м за время 500мкс. Эксперименты по измерению магнитного поля пучка предполагается проводить на некотором расстоянии (порядка 30см) от выпускного окна, на таком расстоянии за счет рассеяния в атмосфере пучок имеет размер около 4см. Поэтому время dt в (6) возьмем равным 20 мкс, за такое время длина сканирования пучка вдоль выпускного окна составит 4см. Величину сигнала ЭДС берем равной 100мВ, расстояние до прямого тока 20см. Получим значение величины $wS = 6,43$.

Подобрав приемлемую для нашего эксперимента площадь катушки, найдем из (6) оценку для количества витков катушки. На пример для катушки диаметром 5 см количество витков будет 3275.

Практическая часть

После теоретических расчетов была собрана система, моделирующая магнитное поле электронного пучка. В качестве проводящей пластины был взят лист металла, по центру которого было просверлено отверстие, в котором в дальнейшем закреплялся металлический стержень, также в четырех точках листа были сделаны отверстия для закрепления на них контактов, все отверстия и контакты были зачищены, в качестве источника импульсного тока необходимой величины использовалась радиосхема усиления тока на основе биполярного транзистора КТ972А (рис.1). Фотография системы приведена в приложении 1. Для эксперимента было подготовлено и опробовано несколько катушек: на 2500 витков с диаметром 7см, 850 витков с диаметром 11см, а также промышленная катушка прямоугольного сечения (4.5см×5см) и количеством витков 2500. В силу удобства установки на плоской поверхности окончательный выбор катушки для проведения экспериментов был сделан в пользу катушки прямоугольного сечения.

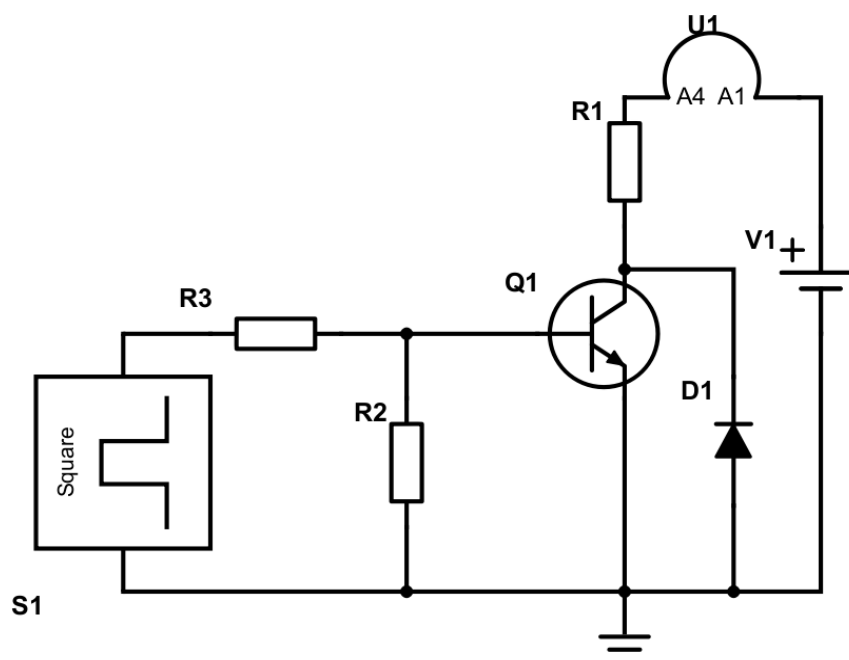


Рис.2 Схема собранной радиосхемы: s1-генератор импульсов прямоугольной формы Г5-54, v1 – источник питания ТЕС 23, R1-20 Ом, R2-10 кОм, R3-10 кОм, Q1-транзистор – КТ972А, D1 – диод – HER208, U1 – металлический стержень.

Был проверен линейный отклик системы (рис. 3).

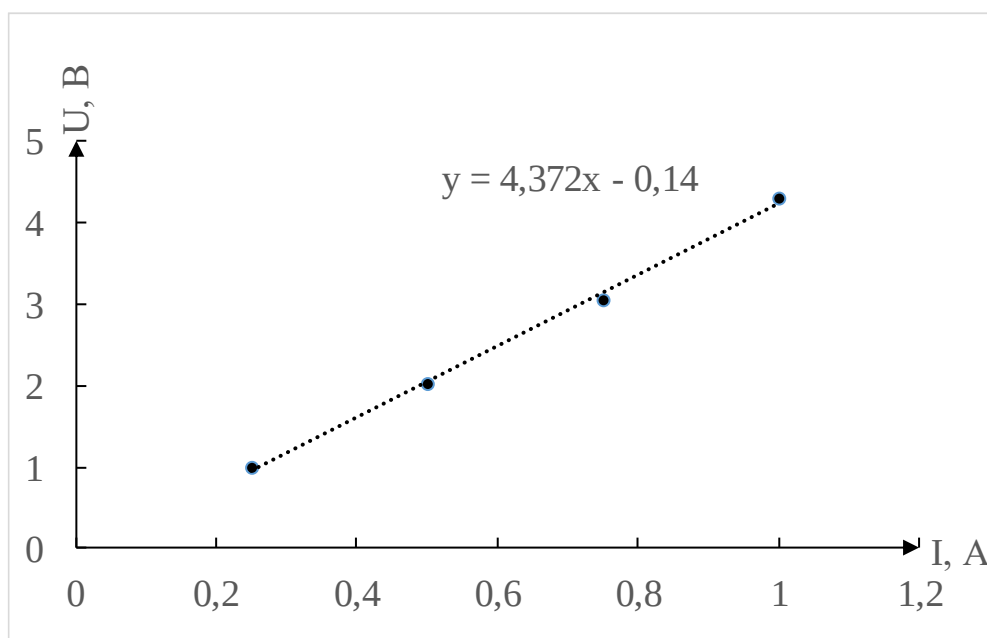


Рис.3 Проверка линейного отклика системы, снятая с катушки ЭДС от силы тока в стержне при длительности импульса 20 микросекунд.

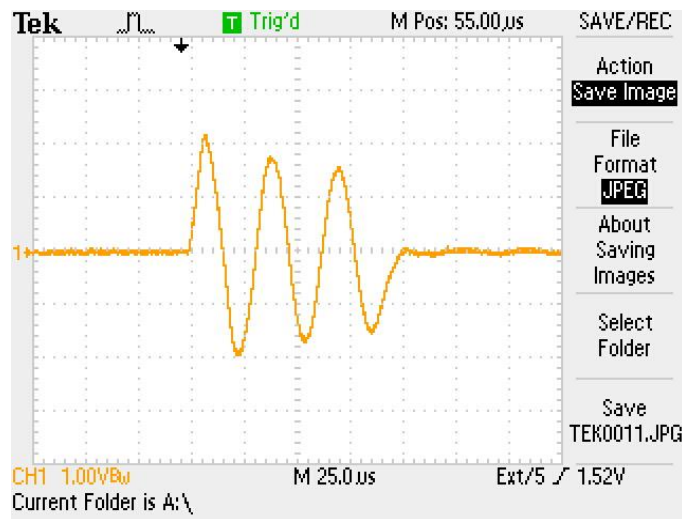


Рис.4 Пример осциллограммы, снятой в эксперименте с металлическим стержнем, при силе тока 0,5А и расстоянии до центра стержня 5см.

Пример снятой осциллограммы (Рис.4). Далее был проведен ряд измерений, и было установлено, что зависимость ЭДС, снимаемой с катушки, от расстояния от стержня (рис. 5) также сходится с теоретическими расчетами из формулы (1).

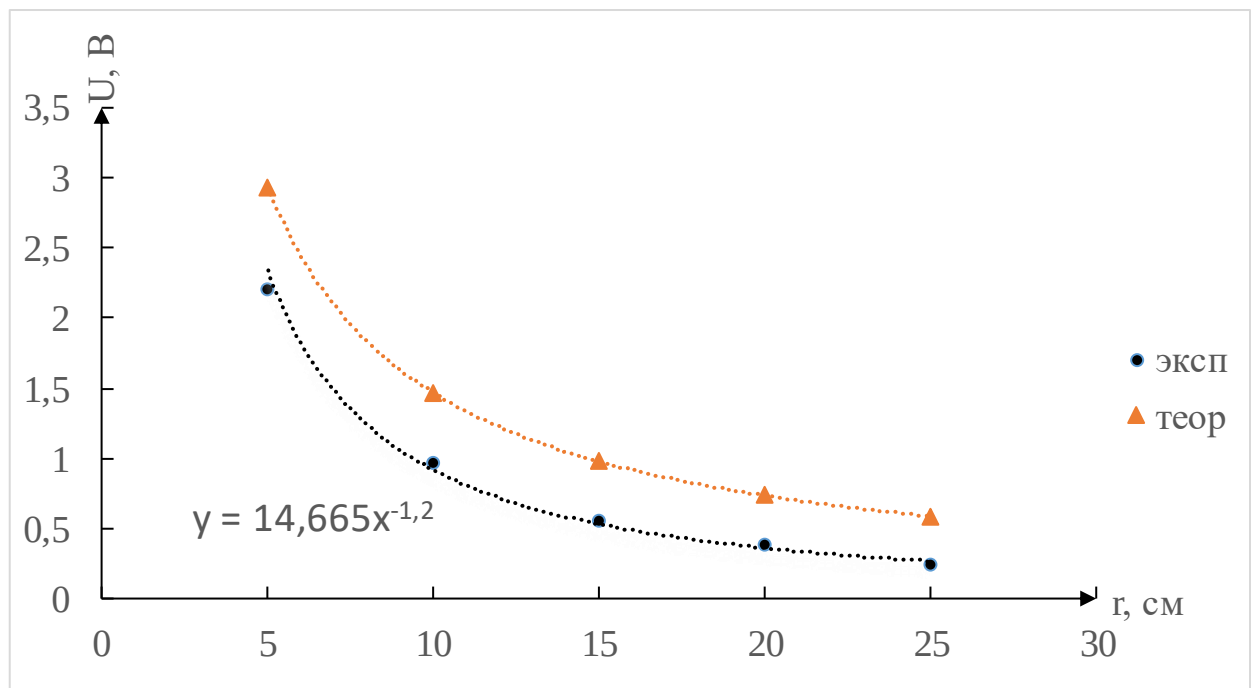


Рис. 5 Зависимость ЭДС катушки от расстояния до центра стержня при силе тока 0,5А.

С помощью прибора для измерения постоянного магнитного поля (FW Bell Gauss/Teslameter, Model 5080) было измерено магнитное поле от стержня, подключенного к источнику постоянного тока. Сила тока в стержне составила

8А, что отличается от силы тока при переменном питании. Так как система обладает линейным откликом, то можно узнать величину магнитного поля в предыдущих экспериментах и откалибровать катушку. В таблице 1 показаны величины постоянного магнитного поля, полученные при помощи прибора для измерения постоянного магнитного поля, в таблице 2 измерения наведенной на катушке ЭДС и соответствующие им магнитные поля, вычисленные после калибровки.

Таб.1 Измерение постоянного магнитного поля стержня, r – расстояние от стержня до катушки, B – магнитное поле

измерение постоянного магнитного поля					
$r, \text{см}$	1	2	3	4	5
B, Γ	1,5	0,8	0,5	0,4	0,3

Таб. 2 Измерение магнитного поля стержня на расстоянии 5 см

$I, \text{А}$	1	0,75	0,5	0,25
$U, \text{В}$	4,3	3,05	2,02	0,74
B, Γ	0,038	0,027	0,018	0,006

При проведении эксперимента на ускорителе, было выявлено наличие на катушке ЭДС, наведенной магнитным полем стороннего происхождения (наводка от ускорителя) (таб.3). Измерения наводки проводились на расстоянии 10 см от центра выпускного окна, схема проведения эксперимента (рис. 6) фотография эксперимента (приложение 2)

Таб. 3 Зависимость наведенной ЭДС от положения катушки в пространстве.

положение, град	0	45	90	135
$U, \text{В}$	0,24	0,24	0,24	0,24

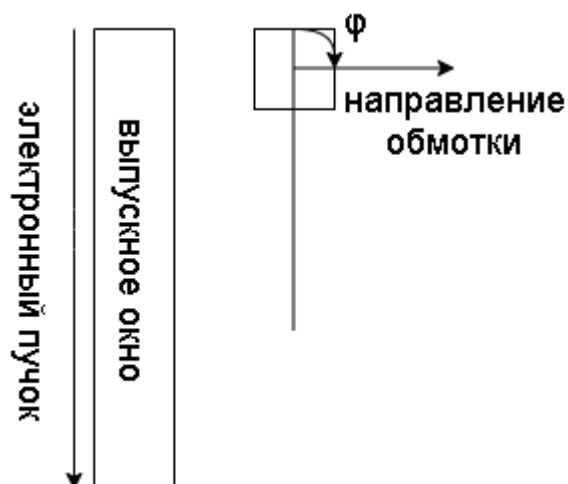


Рис.6 Схема проведения эксперимента на ускорителе

Затем были сделаны измерения при разных значениях импульсного тока пучка: 240mA, 320mA, 400mA (таб. 4,5,6). На второй канал осциллографа подавался сигнал с металлической пластины, на которую падал пучок. На первый канал подавался сигнал с катушки. Металлическая пластина находилась на одном уровне с катушкой, так как моменты пиков сигналов совпадают, то можно сделать вывод, что на катушке наводится ЭДС, наведенная именно электронным пучком (Рис.9).

Таб. 4 Зависимость ЭДС от силы тока пучка на расстоянии 5 см

положение,град	I,mA	U,B
0	240	17,2
0	320	21
0	400	24,6

Таб.5 Зависимость ЭДС от силы тока пучка на расстоянии 10 см

положение,град	I,mA	U,B
0	240	8,5
0	320	10,5
0	400	12,6
90	240	9,8
90	320	11,8
90	400	14

Таб.6 Зависимость ЭДС от силы тока пучка на расстоянии 15 см

положение,град	I,mA	U,B
0	240	2,56
0	320	3,28
0	400	4
90	240	4
90	320	5
90	400	5,84

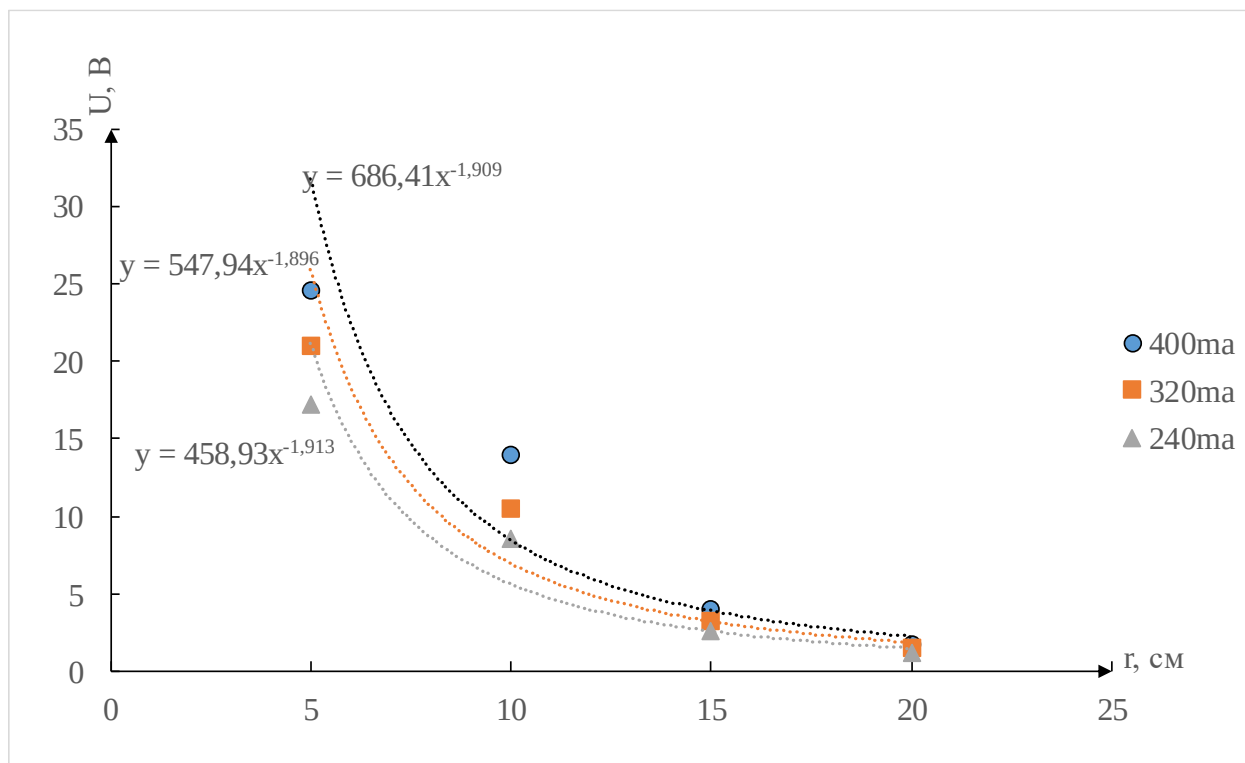


Рис.7 График зависимости ЭДС от расстояния, эксперимент на ускорителе

Измеренная ЭДС также линейно зависит от силы тока пучка (рис.8).

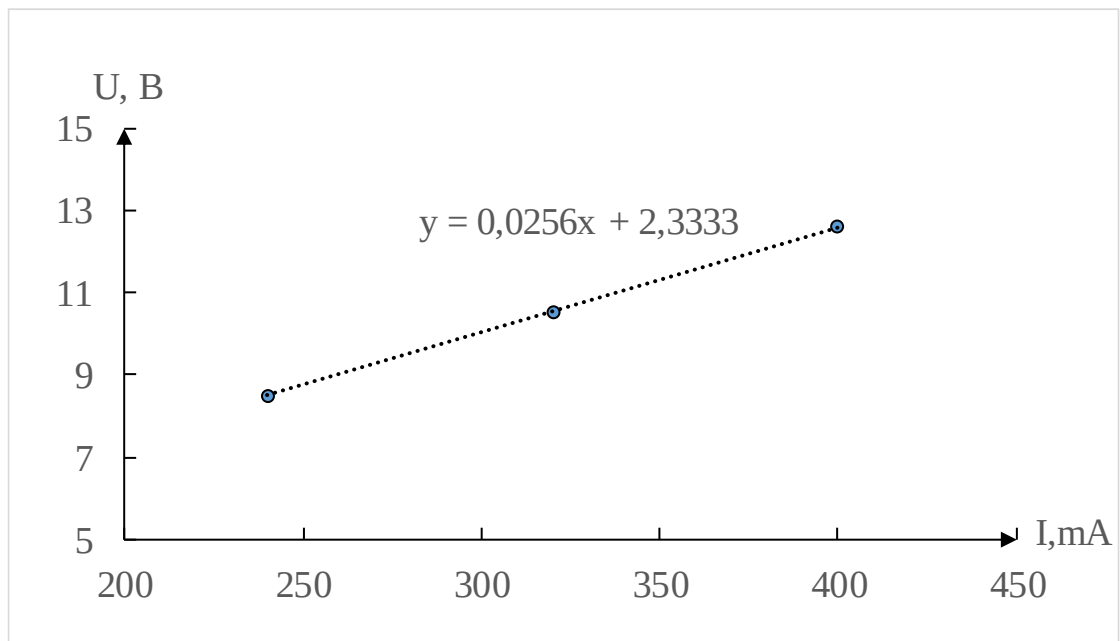


Рис.8 Проверка линейного отклика системы, снятая с катушки ЭДС от силы тока пучка, на расстоянии 10см.

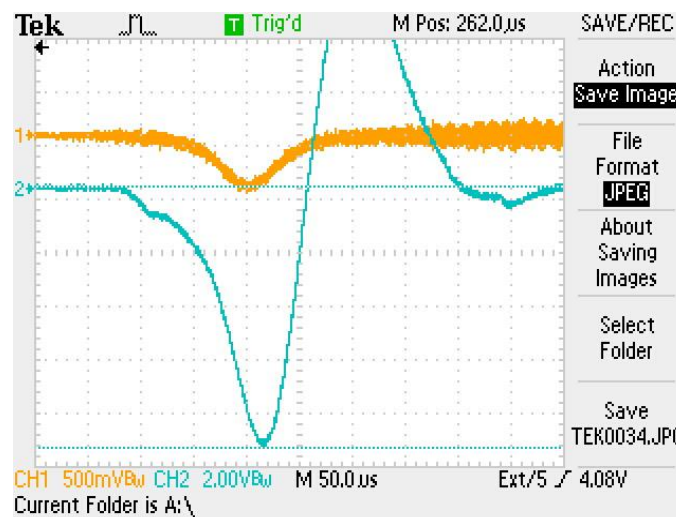


Рис.9 Пример осциллограммы, полученной при измерении на расстоянии 10см, сила тока 240mA, угол 90°, первый канал - сигнал с катушки, второй канал - сигнал с пластины

Обработка результатов и выводы

Так как была произведена калибровка катушки, то можно посчитать коэффициент перевода ЭДС в величину магнитного поля В. Также при нахождении магнитного поля была учтена величина наводки. Величина наведенного сигнала не превышала 10 процентов от измеренной ЭДС. При обработке результатов были получены следующие данные.

Таб.7 Полученные значения магнитного поля

I,ma	240			320			400		
r, cm	5	10	15	5	10	15	5	10	15
B, г	0,148	0,083	0,033	0,181	0,101	0,042	0,212	0,120	0,049

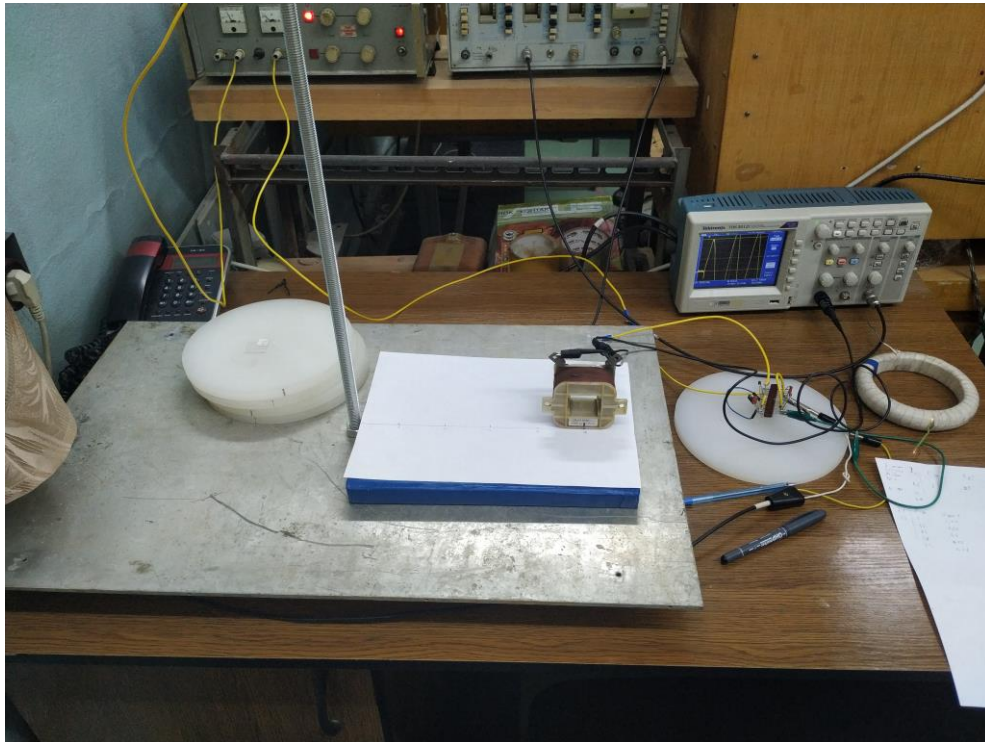
Помимо наводки от ускорителя, существует погрешность прибора при измерении постоянного магнитного поля и калибровке сигнала с катушки. Максимальное разрешение указанного выше тесламетра в диапазоне измеряемых величин магнитных полей от 0 до 300Гс составляет 0.1Гс.

В данной работе была построена теоретическая модель, проведена оценка возможности измерения магнитного поля пучка, проведена калибровка сигнала с катушки. Проведена серия экспериментов по измерению магнитного поля, наведенного электронным пучком ускорителя ИЛУ-6.

Список литературы

1. Меледин Г. В., Черкасский В. С. Электродинамика частиц и полей в задачах //Новосибирск: НГУ. – 2003.
2. Ауслендер В. Л. и др. Импульсные линейные ускорители электронов серии ИЛУ производства Института ядерной физики им. Будкера. – 2006.

Приложение



Приложение 1-фотография системы, моделирующей магнитное поле электронного пучка



Приложение 2-фотография эксперимента на ускорителе.