

Магнитные системы ускорителей

Курс для магистрантов, проф. И.А.Кооп

Аннотация.

Программа данного курса лекций предназначена для магистрантов кафедры физики ускорителей физического факультета НГУ.

Задачей курса является дать будущим физикам ускорительной специализации основные сведения по современному состоянию теории и техники создания магнитных элементов ускорителей.

К моменту слушания курса студенты данной кафедры уже знакомы с теорией различных физических процессов в циклических ускорителях, принципах управления движением заряженных частиц в ускорителях и накопительных кольцах. Некоторые из них уже выполняли какие-то исследования, связанные с созданием различного типа магнитов. Но большая часть магистрантов 1-го года обучения ещё не участвовали в проектировании и создании магнитных систем ускорителей и нуждаются в получении всесторонней информации, относящейся к этим вопросам.

Техника и технологии производства магнитов ускорителей непрерывно совершенствуются, и одной из главных целей курса является желание показать самые последние идеи и разработки в этой области физики и техники. В первую очередь это относится к разделу сверхпроводящих магнитов и систем. Достижение всё более высоких энергий ускорителей напрямую связано с прогрессом в технологии производства сверхпроводников и изделий из них. Так, Большой Адронный Коллайдер в Женеве, ведёт поиск новых частиц в столкновениях двух протонных пучков с энергиями 2 по 7 ТэВ. При этом частицы в тоннеле длиной 27 км поворачиваются магнитным полем 8 Тесла. Но в настоящее время уже началась разработка проекта коллайдера следующего поколения, который будет размещаться в тоннеле длиной 100 км и использовать магниты с полем 16-20 Тесла.

В ИЯФ СО РАН накоплен богатейший опыт проектирования и создания всевозможных магнитных элементов. Это и водо-охлаждаемые магниты, и сверхпроводящие, и импульсные, и постоянные и многие специальные. ИЯФ создал и поставил различные ускорители и их подсистемы наверное во все известные ускорительные центры в мире. Автор курса принимал участие в создании практически всех типов магнитных элементов. В частности, четыре сверхпроводящих соленоида для нового накопительного кольца ВЭПП-2000 с рекордным в мире для ускорителей полем 13 Тесла, были созданы при его активном участии. В настоящее время под его руководством идёт создание накопительного кольца CR в Дармштадте, в международном ускорительном центре FAIR. Вес всех магнитов этого кольца превышает 2000 тонн, а требование к уровню точности полей во всех элементах кольца порядка 10^{-4} . Автор, конечно же, знакомит слушателей курса с последними новинками в теории, технике и технологии создания магнитных систем ускорителей на примерах собственных и других разработок.

В программу курса входит посещение ускорительных комплексов ИЯФ, измерительных стендов, знакомство на месте с новейшими разработками лабораторий. В целом программа рассчитана на 8 лекционных занятий и двух-трёх ознакомительных экскурсий по лабораториям. Иллюстративная часть материала представлена в виде компьютерных презентаций.

Магнитные системы ускорителей

Программа курса для магистрантов, проф. И.А.Кооп

1. Обзор современных циклических ускорителей.
2. Уравнения электродинамики. Интегральные соотношения. Системы единиц. Двумерные магнитные поля. Комплексный скалярный и векторный потенциалы.
3. Мультипольные разложения двумерных полей. Дипольные, квадрупольные и секстипольные магниты.
4. Краевые поля магнитов. Краевые мультипольные разложения. Двумерное описание краевого поля дипольного магнита с широким полюсом.
5. Магниты с нормально-проводящими обмотками. Магнитные материалы. Примеры оптимальных конструкций. Весовые и мощностные характеристики магнитов. Проблемы охлаждения обмоток.
6. Импульсные магниты. Примеры конструкций. Обсуждение преимуществ и недостатков импульсных магнитных систем. Энергоемкость магнитов. Импульсные системы питания. Синхротрон БЗМ, впускные магниты в накопительные кольца ИЯФ, импульсные линзы канала БЭП-ВЭПП2000.
7. Сверхпроводники, их основные технические характеристики. Сверхпроводящие магниты. Соленоиды. Магнитные силы. Энергия поля. Примеры конструкций сверхпроводящих магнитов. Соленоид детектора КЕДР. Соленоиды коллайдера ВЭПП2000. Виглеры, ондуляторы. Криогенные системы. Токовводы с охлаждением газообразным гелием. Токовводы с применением высокотемпературных сверхпроводников.
8. Постоянные магниты. Характеристики магнито жестких материалов. Примеры магнитных систем ускорителей на постоянных магнитах.

Литература

1. К.Штеффен. **Оптика пучков высокой энергии**. Москва: Мир, 1969
2. Alexander Wu Chao, Maury Tigner
Handbook of accelerator physics and engineering.
Singapore: World Scientific, 1999
3. Г.Брехна. **Сверхпроводящие магнитные системы**. Изд. Мир, 1976.
4. М.Уилсон. **Сверхпроводящие магниты**. Изд. Мир, 1985.
5. M.Wilson. Интернет-лекции: **Superconducting Accelerators**, *Cockcroft Institute June 2006*.

Примеры экзаменационных заданий и вопросов.

1. Уравнения Максвелла для статического магнитного поля. Единицы измерения магнитных полей, их связь с током.
2. Системы единиц СИ и Гаусса. Теорема Стокса.
3. Комплексный скалярный и векторный потенциалы двумерных магнитных полей.
4. Двумерные мультипольные разложения полей. Их связь с комплексным описанием полей.
5. Найти энергию поля соленоида детектора CMS. Параметры соленоида: поле 4 Тесла, диаметр 4 м, длина 12 м. Сравнить её с кинетической энергией самолета имеющего массу 200 тонн и летящего со скоростью 708 км/час.
6. Найти Ампер-витки сверхпроводящей квадрупольной линзы с цилиндрической геометрией. Задан градиент магнитного поля $G=10$ кГс/см, радиус апертуры $a=5$ см, длина линзы $l=100$ см. Толщиной обмотки пренебречь. Найти также поле при $r > a$.
7. Найти требуемую энергоёмкость конденсаторной батареи системы питания импульсного синхротрона Б-3М. Величина магнитного поля $B=8$ кГс, радиус кривизны орбиты 1 м, размеры апертурного окна синхротрона 15 x 15 см. Длительность четверти периода разряда батареи 1 мсек. Найти импульсную и среднюю мощность системы питания такого ускорителя при частоте повторения импульсов 1 Гц. Найти толщину скин-слоя в медных шинах.
8. Найти профиль стальных полюсов квадрупольной линзы с градиентом поля $G=1$ кГс/см и радиусом апертуры $a=5$ см, в которую внесён также небольшой секступольный градиент $S=0.005$ кГс/см².
9. Оценить с какой силой стальной магнитопровод соленоидов ВЭПП-2000 втягивается внутрь детектора КМД-3. Величина поля КМД 15 кГс, радиус отверстия магнитопровода детектора 10 см. Геометрия задачи показана на рисунке.
10. Показать направление действия сил на обмотки дипольных магнитов накопительного кольца БЭП, рисунок сечения магнита прилагается. Оценить величину этих сил для тока питания магнита 10 кА. Все размеры заданы на рисунке.
11. Оценить энергоёмкость создаваемого сверхпроводящего быстроциклического синхротрона SIS-100 в Дармштадте. Заданы величина поля 1.6 Тесла, радиус поворота дипольных магнитов 60 м, размер апертурного окна 12 x 15 см. Определить индуктивность системы при токе питания 10 кА. Оценить величину полного напряжения на обмотках для скорости подъема поля 4 Тесла/сек.
12. Сверхпроводящий соленоид детектора КЕДР имеет следующие параметры: поле достигает 1.5 Тесла, диаметр катушки 3 метра, длина соленоида 3 метра. Оценить Ампер-витки в обмотке. Найти энергию поля и определить необходимую толщину и вес стального магнитопровода для данной системы.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»

Кафедра физики ускорителей



УТВЕРЖДАЮ
 Декан ФФ
 А. Е. Бондарь
 « 10 » июня 2014 г.

МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ УСКОРИТЕЛЕЙ

Рабочая программа дисциплины

Физический факультет

Направление подготовки

011200 Физика (квалификация (степень) «магистр»)

Профиль:

Физика ускорителей

Форма обучения

Очная

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)			Промежуточная аттестация (в период сессии) (в часах)		
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем (консультации, экзамен)
		Лекции	Семинары в т.ч. зачет	Лабораторные занятия			
1	2	3	4	5	6	7	8
1	36	16	2	4	14		
Всего 36 часов / 1 зачетная единица из них: - контактная работа 22 часа - в интерактивных формах 10 часов							

Новосибирск 2014

Рабочая программа дисциплины «Магнитные системы ускорителей» предназначенная для магистрантов физического факультета НГУ, разработана в 2011 году в соответствии с ФГОС ВПО по направлению подготовки 011200 Физика (квалификация «магистр») от 18.11.2009, приведена в соответствие с требованиями Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования от 19.12.2013.

Место дисциплины в структуре учебного плана
М.2 «Профессиональный цикл. Вариативная часть».

Составили:

доктор. физ.-мат. наук, проф. И. А. Кооп

Рабочая программа

Содержание

Аннотация.....	4
1. Цели освоения дисциплины.....	5
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.....	5
3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины	5
4. Структура и содержание дисциплины	6
5. Образовательные технологии	7
6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов	8
7. Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения дисциплины: показатели, критерии оценивания компетенций, типовые контрольные задания	8
8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.....	8
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины.....	8

I. Рабочая программа дисциплины «Магнитные системы ускорителей»

Аннотация

Программа курса «Магнитные системы ускорителей» составлена в соответствии с требованиями к обязательному минимуму содержания и уровню подготовки магистра по направлению 011200 Физика, а также задачами, стоящими перед Новосибирским государственным университетом по реализации Программы развития НГУ. Дисциплина реализуется на Физическом факультете Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ) кафедрой физики ускорителей. Дисциплина изучается магистрантами физического факультета.

Задачей курса является дать будущим физикам ускорительной специализации основные сведения по современному состоянию теории и техники создания магнитных элементов ускорителей.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника общекультурных компетенций ОК-1, ОК-5, ОК-7, а также профессиональных компетенций ПК-1, ПК-2, ПК-5, ПК-6, ПК-9 и ПК-10.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: интерактивные лекции (лекции-дискуссии, лекции с разбором конкретных ситуаций), экскурсии, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, зачёт с оценкой.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль успеваемости: задания для самостоятельного решения.

Промежуточная аттестация: зачёт с оценкой.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины – 1 зачетная единица:

- занятия лекционного типа – 16 часов;
- лабораторные занятия (экскурсии) – 4 часа;
- занятия семинарского типа (в т.ч. зачет) – 2 часа;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 14 часов;

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, семинарского типа) составляет 22 часа.

Работа с обучающимися в интерактивных формах составляет 10 часов.

1. Цели освоения дисциплины

Задачей дисциплины (курса) «Магнитные системы ускорителей»: дать будущим физикам ускорительной специализации основные сведения по современному состоянию теории и техники создания магнитных элементов ускорителей.

К моменту слушания курса студенты данной кафедры уже знакомы с теорией различных физических процессов в циклических ускорителях, принципах управления движением заряженных частиц в ускорителях и накопительных кольцах. Некоторые из них уже выполняли различные исследования, связанные с созданием различного типа магнитов. Но большая часть магистрантов обучения ещё не участвовала в проектировании и создании магнитных систем ускорителей и нуждается в получении всесторонней информации, относящейся к данным вопросам.

Техника и технологии производства магнитов ускорителей непрерывно совершенствуются, и одной из главных целей курса является необходимость показать самые последние идеи и разработки в этой области физики и техники. В первую очередь это относится к разделу сверхпроводящих магнитов и систем. Достижение всё более высоких энергий ускорителей напрямую связано с прогрессом в технологии производства сверхпроводников и изделий из них. Так, Большой Адронный Коллайдер в Женеве, ведёт поиск новых частиц в столкновениях двух протонных пучков с энергиями 2 по 7 ТэВ. При этом частицы в тоннеле длиной 27 км поворачиваются магнитным полем 8 Тесла. Но в настоящее время уже началась разработка проекта коллайдера следующего поколения, который будет размещаться в тоннеле длиной 100 км и использовать магниты с полем 16-20 Тесла.

В программу курса входит посещение ускорительных комплексов ИЯФ, измерительных стендов, знакомство на месте с новейшими разработками лабораторий.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Магнитные системы ускорителей» относится к циклу М.2 «Профессиональный цикл. Вариативная часть».

Студенты, приступающие к изучению этой дисциплины, должны иметь общую базовую подготовку в рамках программы первых четырех лет обучения в ВУЗе, в том числе:

- Математический анализ;
- Высшая алгебра;
- Электродинамика;
- Электронная оптика и физика пучков;
- Циклические ускорители;
- Линейные ускорители.

Результаты освоения дисциплины используются в следующих дисциплинах данной ООП:

- Практика и научно-исследовательская работа в НИИ.

3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

Общекультурные компетенции ОК-1, ОК-5, ОК-7, а также профессиональные компетенции ПК-1, ПК-2, ПК-5, ПК-6, ПК-9 и ПК-10.

4. Структура и содержание дисциплины

Дисциплина «Магнитные системы ускорителей» представляет собой курс, читаемый магистрантам физического факультета НГУ в 1-м семестре. Общая трудоемкость дисциплины составляет 1 зачетную единицу, 36 академических часов.

В ИЯФ СО РАН накоплен богатейший опыт проектирования и создания всевозможных магнитных элементов. Это и водо-охлаждаемые магниты, и сверхпроводящие, и импульсные, и постоянные и многие специальные. ИЯФ создал и поставил различные ускорители и их подсистемы, наверное, во все известные ускорительные центры в мире.

Автор курса принимал участие в создании практически всех типов магнитных элементов. В частности, четыре сверхпроводящих соленоида для нового накопительного кольца ВЭПП-2000 с рекордным в мире для ускорителей полем 13 Тесла, были созданы при его активном участии. В настоящее время под его руководством идёт создание накопительного кольца CR в Дармштадте, в международном ускорительном центре FAIR. Вес всех магнитов этого кольца превышает 2000 тонн, а требование к уровню точности полей во всех элементах кольца порядка 10^{-4} . Преподаватель, конечно же, знакомит слушателей курса с последними новинками в теории, технике и технологии создания магнитных систем ускорителей на примерах собственных и других разработок.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя курса	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Промежуточная аттестация (в период сессии) (в часах)	
			Всего	Аудиторные часы				Сам. работа в течение семестра (не включая период сессии)
				Лекции (кол-во часов)	Лабораторные (кол-во часов)	Семинары (кол-во часов)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Введение	1	4	2			2	
2	Мультипольные разложения двумерных полей. Краевые поля	2-3	4	2			2	
3	Магниты с нормально-проводящими обмотками	4-6	6	4			2	
4	Экскурсия	4	2		2			
5	Импульсные магниты	7-9	7	4			2	
6	Экскурсия	6	2		2			
7	Сверхпроводники	10-12	4	2			2	
8	Постоянные магниты	13-17	4	2			2	
9	Самостоятельная подготовка обучающегося к зачету	18					2	
10	Зачёт	18	2			2		
Всего			36	16	4	2	14	

Программа курса:

1. **Введение.** Обзор современных циклических ускорителей. Уравнения электродинамики. Интегральные соотношения. Системы единиц. Двумерные магнитные поля. Комплексный скалярный и векторный потенциалы.
2. **Мультипольные разложения двумерных полей. Краевые поля.** Дипольные, квадрупольные и секстипольные магниты. Краевые поля магнитов. Краевые мультипольные разложения. Двумерное описание краевого поля дипольного магнита с широким полюсом.
3. **Магниты с нормально-проводящими обмотками.** Магнитные материалы. Примеры оптимальных конструкций. Весовые и мощностные характеристики магнитов. Проблемы охлаждения обмоток.
4. **Экскурсия.** Экскурсия на строящиеся и действующие ускорительные установки и ускорительные комплексы.
5. **Импульсные магниты.** Примеры конструкций. Обсуждение преимуществ и недостатков импульсных магнитных систем. Энергоемкость магнитов. Импульсные системы питания. Синхротрон БЗМ, впускные магниты в накопительные кольца ИЯФ, импульсные линзы канала БЭП-ВЭПП2000.
6. **Экскурсия.** Экскурсия на строящиеся и действующие ускорительные установки и ускорительные комплексы.
7. **Сверхпроводники.** Их основные технические характеристики. Сверхпроводящие магниты. Соленоиды. Магнитные силы. Энергия поля. Примеры конструкций сверхпроводящих магнитов. Соленоид детектора КЕДР. Соленоиды коллайдера ВЭПП2000. Виглеры, ондуляторы. Криогенные системы. Токовводы с охлаждением газообразным гелием. Токовводы с применением высокотемпературных сверхпроводников.
8. **Постоянные магниты.** Характеристики магнито жестких материалов. Примеры магнитных систем ускорителей на постоянных магнитах.

5. Образовательные технологии

Учебный курс «Магнитные системы ускорителей» носит преимущественно лекционный характер. Изучение и закрепление нового материала происходит на интерактивных лекциях: лекциях-дискуссиях и лекциях с разбором конкретных ситуаций и конкретных примеров построения конкретных магнитных систем. При подаче материала лекционного курса используется мультимедийная техника. На экран выводятся формулировки, определения, основные понятия, а также графические иллюстрации, помогающие наглядно подать материал. Существенным элементом образовательных технологий является не только умение студента найти решение задачи, но и способность доходчиво донести его до всей аудитории, при этом поощряется элемент соревновательности. Умение ответить на вопросы сокурсников и преподавателя развивает навыки, которые будут необходимы в дальнейшей профессиональной деятельности студента. Важнейшим элементом технологии является самостоятельное решение заданий студентами. Это единственная полностью индивидуальная форма обучения. Сдача заданий в устной форме преподавателю во время зачётных занятий направлена на формирование коммуникативных навыков, умения объяснять, логически излагать решение, быстро отвечать на вопросы преподавателя. Студент рассказывает свое решение преподавателю, отвечает на дополнительные вопросы.

6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

1. К.Штеффен. **Оптика пучков высокой энергии**. Москва: Мир, 1969.

7. Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения дисциплины: показатели, критерии оценивания компетенций, типовые контрольные задания

Освоение компетенций оценивается по двухбалльной шкале «сформирована/не сформирована». Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленные общекультурные компетенции ОК-1, ОК-5, ОК-7, а также профессиональные компетенции ПК-1, ПК-2, ПК-5, ПК-6, ПК-9 и ПК-10 сформированы.

Образец задания для самостоятельной работы:

Найти Ампер-витки сверхпроводящей квадрупольной линзы с цилиндрической геометрией. Задан градиент магнитного поля $G=10$ кГс/см, радиус апертуры $a=5$ см, длина линзы $l=100$ см. Толщиной обмотки пренебречь. Найти также поле при $r>a$.

8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Обязательная литература:

1. К.Штеффен. **Оптика пучков высокой энергии**. Москва: Мир, 1969.
2. Дж. Лоусон. **Физика пучков заряженных частиц**. М. Мир, 1980

Дополнительная литература:

1. Г.Брехна. **Сверхпроводящие магнитные системы**. Изд. Мир, 1976.
2. М.Уилсон. **Сверхпроводящие магниты**. Изд. Мир, 1985.

Интернет ресурсы:

1. Методические материалы на сайте кафедры физики ускорителей ФФ НГУ
<http://accel.inp.nsk.su/>

9. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Дисциплина обеспечена лекционными аудиториями Института ядерной физики СО РАН.

Оснащение основных лекционных аудиторий ИЯФ:

Аудитория ВЭПП-4. – Лекционная аудитория на 30 мест:

а) основное оборудование:

ручной подвесной проекционный экран 127см*127см

Вспомогательный переносной проектор EPSON EMP-1715

Пристройка 2 эт. – Лекционная аудитория на 48 мест:

а) основное оборудование:

Стационарный (подвесной) проектор EPSON EB-X72 с пультом;
Ноутбук DELL PP22L;

б) дополнительное оборудование:

ручной подвесной проекционный экран 127см*127см
Вспомогательный переносной проектор EPSON EMP-1715

Зал для конференций – на 305 мест

а) основное оборудование:

Переносной проектор NEC VT660 с пультом;
Ноутбук ASPIRE 5720;

б) дополнительное оборудование:

электрический подвесной проекционный экран 200м*200м
проектор для больших презентаций SANYO PLC-XP57L
беспроводные инфракрасные микрофоны и аппаратура воспроизведения звука.

Возможность использования интернет библиотек.

Экскурсии, предусмотренные программой курса, могут проводиться с соблюдением норм техники безопасности на строящиеся и действующие установки и стенды ИЯФ СО РАН:

- ВЭПП-2000,
- ВЭПП-4М,
- ВЭПП-5,
- ЦКП «Ускорительный масс-спектрометр» (AMS),
- Лазер на свободных электронах,
- И другие...

Рабочая программа дисциплины одобрена на заседании кафедры физики ускорителей физического факультета НГУ.