

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет
Кафедра физики ускорителей**



Рабочая программа дисциплины

МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ УСКОРИТЕЛЕЙ

направление подготовки: **03.04.02 Физика**
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения

Очная

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	36	16			18				2	
Всего 36 часов / 1 зачётная единица, из них: - контактная работа 18 часов										
Компетенции: ПК-1										

Руководитель программы
д.ф.-м.н.,

И.Б. Логашенко

Новосибирск, 2022

Содержание:

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.	3
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.	4
5. Перечень учебной литературы.	6
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.	6
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.	6
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	6
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.	7
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	7

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Дисциплина «Магнитные системы ускорителей» имеет своей целью дать профессионально подготовленным физикам на доступном им высоком уровне информацию о принципах действия и устройстве магнитных элементов и систем ускорителей, а также технологиях, применяемых при их создании. Она предназначена для обучения специалистов, которые будут в своей последующей работе использовать знание об устройстве и принципе работы новых технологически сложных магнитных компонентов современных ускорителей заряженных частиц и коллайдеров.

Для достижения поставленной цели используются материалы, изложенные в профессиональных изданиях: научных статьях, сборниках трудов конференций, монографиях ведущих специалистов. Также реализуется возможность контакта с разработчиками магнитов, работающими в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, имеющими многолетний опыт создания устройств для уникальных исследовательских установок ИЯФ.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ПК-1 Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	<p>ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p> <p>ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p>Знать принципы работы и конструкции основных магнитных элементов ускорителей, а также физические явления, лежащие в основе разработки, расчета и создания магнитных элементов ускорителей.</p> <p>Уметь проводить расчёты конструкции различных магнитных узлов, используемых в ускорителях заряженных частиц.</p> <p>Владеть численными и аналитическими методами расчёта магнитных полей, методами оптимизации полей магнитных элементов современных ускорительных установок.</p>

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина «Магнитные системы ускорителей» реализуется в осеннем семестре 1-го курса для магистратов, обучающихся по направлению «03.04.02 Физика». Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой физики ускорителей.

Для его восприятия требуется предварительная подготовка студентов по таким физическим дисциплинам как электродинамика, электронная оптика и физика пучков, а также по математике (основы математического анализа, линейная алгебра и геометрия). Дисциплина должна предшествовать выполнению выпускной квалификационной работы т.к. дает магистранту необходимые знания, навыки и предоставляет инструменты для выполнения исследований в области физики ускорителей в рамках ее подготовки.

3. Трудоемкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	36	16			18				2	
Всего 36 часов / 1 зачётных единицы, из них: - контактная работа 18 часов										
Компетенции ПК-1										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, самостоятельная работа студента, дифференцированный зачет.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

- текущий контроль успеваемости: контрольные вопросы на знание материала предыдущей лекции;
- промежуточная аттестация: дифференцированный зачет.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 1 зачетную единицу.

- занятия лекционного типа – 16 часов;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 18 часов;
- промежуточная аттестация (дифференцированный зачет) – 2 часа.

Объем контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, дифференцированный зачет) составляет 18 часов.

4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.

Дисциплина «Магнитные системы ускорителей» представляет собой полугодовой курс, читаемый в осеннем семестре 1-го курса магистратуры физического факультета НГУ. Общая трудоемкость дисциплины составляет 1 зачётную единицу, 36 академических часов.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)	Промежуточ-
-------	-------------------	-----------------	--	-------------

1	2	3	Всего	Аудиторные часы		7	8
				Лекции	Практические занятия		
1.	Современных циклические ускорители. Типы магнитов в ускорительной технике.	1-2	4	2		2	
2.	Уравнения Максвелла. Мультипольные разложения двумерных полей.	3-4	4	2		2	
3.	Магниты с нормально-проводящими обмотками. Магнитомягкие материалы.	5-6	4	2		2	
4.	Импульсные магниты и их применение.	7-10	8	4		4	
5.	Сверхпроводящие магниты и их применение.	11-14	8	4		4	
6.	Постоянные магниты. Вигглеры и ондуляторы.	15-16	6	2		4	
7.	Дифференцированный зачёт	17	2				2
8.	Всего		36	16		18	2

Программа и основное содержание лекций (16 часов)

- 1. Современные циклические ускорители. Типы магнитов в ускорительной технике. (2 часа)**
Обзорная лекция по действующим и интересным с научно-технической точки зрения ускорителям и ускорительным комплексам в мире. Ознакомительная экскурсия на электрон-позитронные коллайдеры ИЯФ СО РАН им. Г.И.Будкера.
- 2. Уравнения Максвелла. (2 часа)**
Интегральные соотношения. Системы единиц. Двумерные магнитные поля. Комплексный, скалярный и векторный потенциалы. Уравнения, определяющие величину и конфигурацию магнитных полей. Метод потенциалов. Единицы измерений. Дипольные, квадрупольные и секстипольные магниты. Мультипольное разложение двумерных магнитных полей. Краевые поля магнитов.
- 3. Магниты с нормально-проводящими обмотками. (2 часа)**
Магнитные материалы. Примеры оптимальных конструкций магнитов с нормально-проводящими обмотками. Весовые и мощностные параметры магнитов. Охлаждение обмоток. Технические проблемы реализации магнитов с нормально-проводящими обмотками.
- 4. Импульсные магниты. (4 часа)**
Импульсные магниты. Преимущества и недостатки импульсных магнитных систем. Энергоемкость магнитов. Импульсные системы питания. Магниты коллайдера ВЭПП-2000. Различные конструкции импульсных магнитных систем – конверсионные узлы, импульсные синхротроны и т.д. Реализация впускных устройств коллайдера ВЭПП-2000 и других ускорителей.
- 5. Сверхпроводящие магниты. (4 часа)**

Сверхпроводники, их основные технические характеристики. Сверхпроводящие магниты. Соленоиды. Магнитные силы. Энергия поля. Современные сверхпроводящие сплавы.

6. Постоянные магниты. (2 часа)

Характеристики магнито-жестких материалов. Примеры магнитных систем ускорителей на постоянных магнитах, ондуляторы и вигглеры.

Самостоятельная работа студентов (18 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Изучение материала лекций	9
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	9

5. Перечень учебной литературы.

1. К.Штеффен. Оптика пучков высокой энергии. Москва: Мир, 1969 (1 экз.)
2. Г.Брехна. **Сверхпроводящие магнитные системы.** Изд. Мир, 1976. (1 экз.)

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

1. Методические материалы на сайте кафедры физики ускорителей ФФ НГУ:
<http://accel.inp.nsk.su/>
3. К.Штеффен. Оптика пучков высокой энергии. Москва: Мир, 1969.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

7.1 Современные профессиональные базы данных

Не используются.

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.

Для реализации дисциплины «Магнитные системы ускорителей» используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль успеваемости

Текущий контроль успеваемости осуществляется путем опроса в начале каждой лекции по материалам предыдущей лекции.

Промежуточная аттестация

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания материала данного курса. Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит в конце семестра на дифференцированном зачете. Дифференцированный зачет проводится по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ПК-1.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации. Критерии и шкалы оценивания индикаторов достижения результатов обучения отражены в Таблице 10.2.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать принципы работы и конструкции основных магнитных элементов ускорителей, а также физические явления, лежащие в основе разработки, расчета и создания магнитных элементов ускорителей.	Опрос в начале каждой лекции, дифференцированный зачет.
ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Уметь проводить расчёты конструкции различных магнитных узлов, используемых в ускорителях заряженных частиц. Владеть численными и аналитическими методами расчёта магнитных полей, методами оптимизации полей магнитных элементов современных ускорительных установок.	Опрос в начале каждой лекции, дифференцированный зачет.

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Магнитные системы ускорителей».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ПК 1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ПК 1.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допу-	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.

		ошибки.	щены негру- бые ошибки.		
Наличие навыков (владение опытом)	ПК 1.2	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Пример задания для текущего контроля по материалам лекций:

Рассчитать поле идеального бесконечно длинного квадрупольного магнита с током I_0 .

Билеты к дифференцированному зачету

Билет №1.

1. Найти суммарные ампер-витки сверхпроводящего соленоида для детектора будущей электрон-позитронной тау-чарм фабрики. Заданы следующие параметры: длина области поля от одного торца стального магнитопровода до противоположного 4м, диаметр сверхпроводящей катушки 3 м, задано однородное всюду продольное поле 1.5 Тесла.
2. Каково суммарное давление магнитного поля на торцевое железо такого детектора? Куда направлена эта сила?
3. Объяснить смысл скалярного и векторного магнитных потенциалов. Выписать выражения компонент магнитного поля через эти потенциалы.

Билет №2.

1. Оценить энергию магнитного поля, запасаемую в дипольных магнитах импульсного протонного синхротрона на энергию 30 ГэВ. Максимальное поле в магнитах 1.6 Тесла, апертура (область, заполненная полем) ограничена по горизонтали и вертикали размером ± 5 см.
2. Получить формулы координатной зависимости компонент поля секступольной линзы. Прodelать вывод формул и в Декартовой и в полярной системах координат.
3. Выписать формулы электромагнитной индукции.

Билет №3.

1. Заданы следующие параметры сверхпроводящего соленоида для детектора будущей электрон-позитронной тау-чарм фабрики: длина области поля от одного торца стального

- магнитопровода до противоположного 4м, диаметр сверхпроводящей катушки 3 м, задано однородное всюду продольное поле 1.5 Тесла. Вычислить необходимые для получения нужного поля ампер-витки и индуктивность соленоида в предположении, что кабель может пропускать максимальный ток 5 кА, а также энергию магнитного поля и давление поля на катушку. Размером отверстия для вакуумной камеры пучка пренебречь.
2. Вычислить также массу всего железа магнитопровода в предположении, что торцевое железо конически расширяется от нулевого радиуса и нулевой толщины до максимального радиуса, сохраняя всюду в осевом сечении индукцию не выше 1.5 Тесла.
 3. Выписать формулы электромагнитной индукции.

Билет №4.

1. Заданы следующие параметры сверхпроводящего соленоида для детектора будущей электрон-позитронной тау-чарм фабрики: длина области поля от одного торца стального магнитопровода до противоположного 4м, диаметр сверхпроводящей катушки 3 м, задано однородное всюду продольное поле 1.5 Тесла. Вычислить необходимые для получения нужного поля ампер-витки и индуктивность соленоида в предположении, что кабель может пропускать максимальный ток 5 кА, а также энергию магнитного поля и давление поля на катушку. Размером отверстия для вакуумной камеры пучка пренебречь.
2. Какова должна быть минимальная толщина цилиндрической обмотки соленоида, чтобы она выдержала давление такого магнитного поля? Считать, что провод и силовой каркас, куда провод вклеен или впаян, имеют одинаковый предел прочности (лучше уж говорить про предел упругости, который уж точно не стоит превосходить) равный 50 кгс/мм^2 .
3. Записать формулу Био-Савара для поля тонкого провода с током.

Билет №5.

1. Заданы следующие параметры сверхпроводящего соленоида для детектора будущей электрон-позитронной тау-чарм фабрики: длина области поля от одного торца стального магнитопровода до противоположного 4м, диаметр сверхпроводящей катушки 3 м, задано однородное всюду продольное поле 1.5 Тесла. Вычислить необходимые для получения нужного поля ампер-витки и индуктивность соленоида в предположении, что кабель может пропускать максимальный ток 5 кА, а также энергию магнитного поля и давление поля на катушку. Размером отверстия для вакуумной камеры пучка пренебречь.
2. Вычислить также массу всего железа магнитопровода в предположении, что торцевое железо конически расширяется от нулевого радиуса и нулевой толщины до максимального радиуса, сохраняя всюду в осевом сечении индукцию не выше 1.5 Тесла.
3. Выписать формулы электромагнитной индукции.

Билет №6.

1. Найти величину поля в воздушном зазоре дипольного магнита, показанного на слайде 3 лекции 6 (правый рисунок) в предположении, что сумма толщин намагниченных плиток из материала NeFeB равна воздушному зазору. Положить величину остаточного поля в плитках (при $H=0$ на диаграмме слайда 2 лекции 6) равной 1 Тесла. Считать, что толщина плиток и межполюсный зазор много меньше по сравнению с их шириной.
2. Получить формулы координатной зависимости компонент поля секступольной линзы. Прodelать вывод формул и в Декартовой и в полярной системах координат.
3. Выписать уравнения Максвелла для статического магнитного поля.

Билет №7.

1. Найти суммарные ампер-витки сверхпроводящего соленоида для детектора будущей электрон-позитронной тау-чарм фабрики. Заданы следующие параметры: длина области поля от одного торца стального магнитопровода до противоположного 4 м, диаметр сверхпроводящей катушки 3 м, задано однородное всюду продольное поле 1.5 Тесла.
2. Пусть нержавеющей каркас занимает 50% площади продольного сечения цилиндрической обмотки, а остальные 50% приходятся на сверхпроводящий кабель. Вычислить сколько тепла выделится в этом каркасе при вводе полного тока в соленоид. Полную толщину цилиндра взять равной 4 мм. Удельное сопротивление нержавеющей 1 Ом*мм**2/м. Время ввода тока задать самостоятельно. Есть ли от него зависимость?
3. Записать формулу Био-Савара для поля тонкого провода с током.

Билет №8.

1. Оценить энергию магнитного поля, запасаемую в дипольных магнитах импульсного протонного синхротрона на энергию 70 ГэВ. Максимальное поле в магнитах 1.6 Тесла, апертура (область, заполненная полем) ограничена по горизонтали и вертикали размером ± 5 см.
2. Получить формулы координатной зависимости компонент поля секстипольной линзы. Прodelать вывод формул и в Декартовой и в полярной системах координат.
3. Выписать уравнения Максвелла для статического магнитного поля.

Билет №9.

1. Оценить, на какое максимальное поле корректора (левый вариант на слайде 8) можно рассчитывать при следующих параметрах: зазор $h = 5$ см, горизонтальная апертура $H = 10$ см, толщина обмотки $a = 1$ см, толщина каждого обратного ярма $g = 1$ см. Индукция насыщения железного магнитопровода 2 Т.
2. Вычислить поле на оси тонкого кольцевого тока величиной 1 кА, с радиусом 50 см, в двух точках оси: в центре кольца и на расстоянии 50 см от центра.
3. Выписать формулы мультипольного разложения комплексного магнитного скалярного потенциала для двумерных магнитных полей.

Билет №10.

1. Какие ампер-витки нужно иметь для получения градиента поля 2.5 кГс/см в квадрупольной линзе с радиусом вписанного в полюса круга 20 мм.
2. Вычислить поле на оси тонкого кольцевого тока величиной 1 кА, с радиусом 50 см, в двух точках оси: в центре кольца и на расстоянии 50 см от центра.
3. Выписать уравнения Максвелла для статического магнитного поля.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации рабочей программы
по дисциплине «Магнитные системы ускорителей»
по направлению подготовки 03.04.02 Физика
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного