


Российская академия наук  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт электрофизики  
Уральского отделения Российской академии наук  
(ИЭФ УрО РАН)

«Утверждаю»  
Врио. директора ИЭФ УрО РАН



В.Г. Шпак  
2015 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**  
**«Мощная импульсная энергетика»**  
**Б1.В.ДВ.2-2**

Специальность 03.06.01 – «Физика и астрономия»

Екатеринбург  
2015

Программу составил:

г.н.с. ИЭФ УрО РАН  
д.т.н., член-корр. РАН

Яландин М.И.

СОГЛАСОВАНО:

Зам. директора по НР ИЭФ УрО РАН  
к.т.н.

« 6 » февраля 2015 г.

Иванов М.Г.

Учёный секретарь ИЭФ УрО РАН  
к.ф.-м.н.

« 6 » февраля 2015 г.

Кокорина Е.Е.

Рабочая программа утверждена на заседании Учёного совета ИЭФ УрО РАН.  
Протокол № 1 от 06.02.2015 г.

Содержание	
УК-1	Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.
УК-2	Готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач.
УК-3	Способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития.

## 1. Цели и задачи дисциплины.

– Получение слушателем системных знаний в области электрофизики высоковольтных короткоимпульсных систем.

– Ознакомление слушателя с областями фундаментальных и прикладных исследований, а также наукоёмкой практики, использующих достижения в разработке мощных электрофизических устройств.

## 2. Требования к уровню освоения содержания дисциплины.

В результате изучения дисциплины аспирант должен:

### **Знать:**

– подходы и методы синтеза импульсных цепей высоковольтных электрофизических устройств и анализа быстропротекающих процессов в таких цепях.

### **Уметь:**

– применять полученные знания для расчёта высоковольтных блоков импульсных экспериментальных установок.

### **Владеть:**

– навыками использования полученных знаний для проведения научно-исследовательской работы по конкретной тематике.

## 3. Компетенции.

<i>№ п/п</i>	<i>Индекс</i>	<i>Содержание</i>
1.	ОПК-1	Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий.
2.	УК-1	Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.
3.	УК-3	Готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач.
4.	УК-4	Способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития.

5.	ПК-1	Способность ставить, формализовать и решать задачи, умением системно анализировать научные проблемы, генерировать новые идеи и создавать новое знание.
6.	ПК-2	Способность проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы и информационных технологий с учётом отечественного и зарубежного опыта.
7.	ПК-3	Способность пользоваться современными методами обработки, анализа и синтеза информации в избранной области физических исследований.
8.	ПК-4	Способность применять на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ, способность самостоятельно организовывать и проводить научные исследования и внедрять их результаты в качестве члена или руководителя коллектива.

#### 4. Объём дисциплины и виды учебной работы.

<i>Вид учебной работы</i>	<i>Всего</i>		<i>Период обучения</i>
	<i>часов</i>	<i>ЗЕТ</i>	
Общая трудоёмкость дисциплины	108	3	второй курс
Аудиторные занятия, в т.ч.:			
Лекции	36	1	
Практические занятия (ПЗ)			
Самостоятельная работа	54	1,5	
Контроль самостоятельной работы	18	0,5	

#### 5. Содержание дисциплины.

##### 5.1. Разделы дисциплин и виды занятий

<i>№ п/п</i>	<i>Раздел дисциплины</i>	<i>Лекции</i>	<i>ПЗ</i>	<i>Сам. раб.</i>	<i>Контр. сам. раб.</i>
1	Импульсная техника, энергетика и электроника.	10		15	5
2	Ускорители заряженных частиц.	10		15	5
3	Мощные источники электромагнитных импульсов.	8		12	4

4	Атомная и термоядерная энергетика.	8		12	4
Всего час.		36		54	18

## **5.2. Содержание разделов дисциплины.**

### **5.2.1. Импульсная техника, энергетика и электроника.**

#### 5.2.1.1. Методы анализа импульсных процессов.

Законы Кирхгоффа. Классический метод или метод характеристического уравнения. Операторный метод или метод преобразования Лапласа. Метод интеграла Дюамеля.

#### 5.2.1.2. Накопители энергии.

Мощная импульсная техника: области применения. Механические накопители энергии, маховики. Емкостные и индуктивные накопители. Химические накопители. Взрывчатые вещества. Ограничения по плотности запасаемой энергии. Сравнение различных накопителей энергии.

#### 5.2.1.3. Процессы накопления и вывода энергии.

Накопление энергии в емкостных и индуктивных накопителях. Резистивная зарядка емкостного накопителя. Индуктивная зарядка емкостного накопителя. Зарядка индуктивного накопителя. Резистивная зарядка индуктивного накопителя. Добротность колебательного контура. Периодический и аperiodический процессы. Вывод энергии из емкостного накопителя, активная и емкостная нагрузка. Вывод энергии из индуктивного накопителя, активная нагрузка.

#### 5.2.1.4. Методы преобразования токов и напряжений.

Трансформатор Тесла. Трансформатор Тесла с большим коэффициентом связи. Импульсный трансформатор. Индуктивность намагничивания и индуктивность рассеяния. Насыщение ферромагнитного материала. Магнитные ключи и магнитные компрессоры. Генераторы Маркса. Линейные трансформаторы.

#### 5.2.1.5. Волны в передающих линиях.

Волновое уравнение. Уравнение Гемгольца. Мембранные функции. ТЕ и ТМ волны. Закон дисперсии. Главная (ТЕМ) волна. Волны в коаксиальной и полосковой линии. Волновое сопротивление. Сохранение потока энергии в передающей линии. Коэффициенты отражения. Формирующие и передающие линии. Линия Блюмляйна. Неоднородные передающие линии.

#### 5.2.1.6. Коммутация накопителей.

Быстропротекающие коммутационные процессы и классификация коммутаторов. Электрический пробой диэлектриков. Искровые коммутаторы. Полупроводниковые коммутаторы.

#### 5.2.1.7. Экспериментальные методы диагностики.

Емкостные и активные делители. Шунт и пояс Роговского, магнитные зонды.

## **5.2.2. Ускорители заряженных частиц.**

### 5.2.2.1. Заряженная частица во внешних полях.

Движение в электрическом поле. Движение в магнитном поле. Комбинированные поля. Релятивистская динамика частиц. Электронная оптика. Электронный микроскоп. Масс - спектрометрия.

### 5.2.2.2. Ускорители частиц высоких энергий.

Циклотрон. Бетатрон. Синхротрон. Микротрон. Фазотрон. Синхрофазотрон. Ускорители со встречными пучками: накопительные кольца, линейные коллайдеры. Синхротронные колебания. Устойчивость пучков. Автофазировка. Новые методы ускорения и типы ускорителей. Области применения ускорителей. Промышленные ускорители.

### 5.2.2.3. Элементы ускорительных систем высоких энергий.

Форинжекторы: термоэмиссионные пушки; ускорительные трубки. Первеанс; эмиттанс; светимость. Системы фокусировки пучка: жесткая; мягкая. Ускоряющие СВЧ-структуры и питающие генераторы. Мишени-конверторы. Дефлекторы. Диагностика пучков.

### 5.2.2.4. Сильноточные импульсные ускорители.

Классификация. Линейные индукционные ускорители. Импульсные ускорители прямого действия: электронные и ионные. Основные элементы сильноточных ускорительных систем. Примеры сильноточных ускорительных систем и области их применения.

### 5.2.2.5. Эмиттеры плотных потоков электронов.

Автоэлектронная эмиссия (АЭЭ). Взрывная электронная эмиссия (ВЭЭ). Единичный ВЭЭ-центр. Регенерация ВЭЭ-центров. Эффект полировки ненакаливаемых катодов.

### 5.2.2.6. Сильноточные электронные пучки.

Формирование пучка в коаксиальном вакуумном диоде. Формирование пучка в планарном вакуумном диоде. Динамические характеристики вакуумных диодов.

5.2.2.7. Транспортировка плотных электронных потоков. Магнитные фокусирующие системы: техника сильных магнитных полей. Предельный ток электронного пучка. Неустойчивости. Методы численного моделирования. Динамика пучка в дрейфовом канале. Автоускорение.

## **5.2.3. Мощные источники электромагнитных импульсов.**

### 5.2.3.1. Спонтанное излучение движущихся заряженных частиц.

Элементарные механизмы. Магнитотормозное излучение (синхротронное) излучение. Излучение Вавилова-Черенкова. Переходное излучение. Ондуляторное излучение. Рассеяние волн.

### 5.2.3.2. Электромагнитные волны.

Структура волны. Спектр периодического и импульсного поля. Дисперсия.

### 5.2.3.3. Вопросы электродинамики СВЧ.

Волноводы прямоугольного и круглого сечения. Коаксиальная и полосковая линии. Поток энергии в волноводах. Затухание волн в передающих линиях. Резонаторы. Добротность резонаторов.

### 5.2.3.4. Вакуумная СВЧ-электроника больших мощностей.

Инерциальная и силовая группировка частиц в поле ЭМ волны. Волны пространственного заряда в потоке заряженных частиц. Классификация релятивистских микроволновых источников большой мощности. Взаимодействие потока заряженных частиц с полем бегущей волны (ЛБВ). Взаимодействие потока заряженных частиц с полем обратной волны (ЛОВ). Стационарный и нестационарный режимы генерации СВЧ импульсов. Примеры релятивистских СВЧ генераторов. Проблемы СВЧ-электроники больших мощностей. Техника эксперимента. Диагностика.

### 5.2.3.5. Источники сверхширокополосных электромагнитных импульсов.

Свойства сверхширокополосных сигналов. ТЕМ-антенны ударного возбуждения. Рассеяние сверхширокополосных сигналов. Формирование импульсов для возбуждения антенн. Экспериментальная техника. Примеры и области применения.

## 5.2.4. Атомная и термоядерная энергетика.

### 5.2.4.1. Энергия ядерного деления.

Ядерные силы. Радиоактивность. Изотопы. Спонтанное деление. Цепные реакции. Дефект массы. Критическая масса. Обогащение и разделение изотопов. Инициирование реакции деления. Управляемая цепная реакция. Ядерный реактор. Перспективы атомной энергетики.

### 5.2.4.2. Общие сведения о плазме.

Плазменные колебания. Классификация видов плазмы. Столкновения частиц в плазме. Ток  $a$  в плазме. Плазма в высокочастотном поле. Описание плазмы: гидродинамическое и кинетическое. Излучение плазмы. Диффузия и теплопроводность. Методы нагрева плазмы. Неустойчивости.

### 5.2.4.3. Энергия синтеза ядер.

Ядерные реакции. Кулоновский барьер. Энергетическая эффективность. Неуправляемая реакция синтеза. Проблема управляемого термоядерного синтеза. Импульсный УТС. Нагрев плазмы лазером. Магнитное удержание. Термоядерные машины и демонстрационные реакторы.

## 5.3. Самостоятельная работа аспирантов.

5.3.1. Проработка лекционного материала по конспектам и учебной литературе (48 ч.).

5.3.2. Подготовка к контролю по дисциплине (6 ч.).

## **6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.**

### **6.1. Рекомендуемая литература.**

#### **а) основная литература:**

1. Ландау, Л.Д., Лившиц, Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 2005.
2. Месяц, Г.А., Яландин, М.И. Пикосекундная электроника больших мощностей (Обзор) // УФН, 2005. – Т. 175. – № 3. – С. 225–246.
3. Моругин, Л.А., Глебович, Г.В. Наносекундная импульсная техника. – М.: Советское радио, 1964. – 623 с.
4. Месяц, Г.А., Насибов, А.С., Кремнев, В.В. Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения. – М.: Энергия, 1970.
5. Месяц, Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. – М.: Советское радио, 1974.
6. Тамм, И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1966.

#### **б) дополнительная литература:**

1. Кремнев, В.В., Месяц, Г.А. Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике. – Новосибирск: Наука, 1987.
2. Ерофеев, Ю.Н. Основы импульсной техники. – М.: Высшая школа, 1979.
3. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Советское радио, 1963.
4. Глебович, Г.В., Ковалев, И.П. Широкополосные линии передачи импульсных сигналов. – М.: Советское радио, 1973. – 224 с.
5. Котов, Ю.А., Лучинский, А.В. Усиление мощности ёмкостного накопителя энергии прерывателем тока на электрически взрывааемых проводниках. – Физика и техника мощных импульсных систем / [Под ред. Е.П. Велихова]. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
6. Ковальчук, Б.М., Кремнев, В.В. Генераторы Аркадьева–Маркса для сильноточных ускорителей. – Физика и техника мощных импульсных систем / [Под ред. Е.П. Велихова]. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
7. Грехов, И.В. Импульсная коммутация больших мощностей полупроводниковыми приборами. – Физика и техника мощных импульсных систем / [Под ред. Е.П. Велихова]. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
8. Цукерман, В.А., Тарасова, Л.В., Лобов, С.И. Новые источники рентгеновских лучей // УФН, 1971. – Т. 103. – В. 2. – С. 319–337.
9. Лучинский, А.В., Ратахин, Н.А., Федущак, В.Ф., Шепелев, А.Н. Многоцелевой импульсный генератор трансформаторного типа // Изв. вузов. Физика, 1997. – № 12. – С. 67–75.
10. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах / Пер. с англ. под ред. В.С. Комелькова. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
11. Ретер, Г. Электронные лавины и пробой в газах / Пер. с англ. под ред. В.С. Комелькова. – М.: Мир, 1968.



12. Королёв, Ю.Д., Месяц, Г.А. Физика импульсного пробоя газов. – М.: Наука, 1991. – 224 с.
13. Авилов, Э.А., Юрьев, А.Л. Газонаполненные металлокерамические разрядники высокого давления // ПТЭ, 2000. – № 2. – С. 78–81.
14. Яландин, М.И., Шпак, В.Г. Мощные малогабаритные импульсно-периодические генераторы субнаносекундного диапазона (Обзор) // ПТЭ, 2001. – № 3. – С. 5–31.
15. Рухадзе, А.А., Богданкевич, Л.С., Росинский, С.Е., Рухлин, В.Г. Физика сильноточных релятивистских электронных пучков / [Под ред. проф. А.А. Рухадзе]. – М.: Атомиздат, 1980.
16. Генерация и фокусировка сильноточных релятивистских электронных пучков / [Под ред. проф. Л.И. Рудакова]. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
17. Диденко, А.Н., Григорьев, В.П., Усов, Ю.П. Мощные электронные пучки и их применение. – М.: Атомиздат, 1977.
18. Релятивистская высокочастотная электроника (Сборник статей). – Горький, 1981. В. 2.
19. Дюдерштадт, Д., Мозес, Г. Инерциальный термоядерный синтез. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
20. Арцимович, Л.А. Управляемые термоядерные реакции. – М.: Госиздат физ.-мат, лит. 1961.
21. Монтгомери, Д. Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. – М.: Мир, 1971.
22. Кнопфель, Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972.
23. Сильные и сверхсильные магнитные поля и их применение / [Под ред. Ф.Херлаха]. М.: Мир, 1988.
24. Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме – М.: Энергоатомиздат, 1986.
25. Техника больших импульсных токов и магнитных полей (Сборник статей) / [Под ред. В.Г. Комелькова]. – М.: Атомиздат, 1970.
26. Комар, Е.Г. Основы ускорительной техники. – М.: Атомиздат, 1975.
27. Голант, В.Е., Фёдоров, В.Н. Высокочастотные методы нагрева плазмы в тороидальных термоядерных установках. – М.; Энергоатомиздат, 1986.

**в) методическое обеспечение:**

<http://iep7.iep.uran.ru/iep/aspir.htm>

**6.2. Информационное обеспечение.**

№ п/п	Ссылка на информационный ресурс	Наименование разработки в электронной форме	Доступность
	<a href="http://elibrary.ru/">http://elibrary.ru/</a>	Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU	доступ свободный

## **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины.**

Для проведения занятий по дисциплине используются: компьютерный класс, лаборатории Института, оборудование: импульсно-периодический генератор высоковольтных импульсов, цифровые четырёхканальные осциллографы в комплекте с широкополосными измерительными трактами и аттенюаторами, установка для измерения вольт-амперных характеристик, система сбора и обработки информации RL-88, универсальный вакуумный пост, цифровые осциллографы, импульсно-периодический генератор высоковольтных импульсов, цифровые четырёхканальные осциллографы в комплекте с широкополосными измерительными трактами и аттенюаторами, частотный импульсный генератор с полупроводниковым обострителем.

Программа составлена с учётом рекомендаций по формированию основных профессиональных образовательных программ послевузовского профессионального образования для обучающихся в аспирантуре (№ 0160 от 17 июля 2012 г. Серия 90Л01 № 0000173) и на основе Федеральных государственных требований к структуре основной профессиональной образовательной программы послевузовского профессионального образования (аспирантура), утверждённых приказом Министерства образования и науки РФ от 16.03.2011 г. № 1365 (зарегистрирован Министерством юстиции РФ 10.05.2011 г., регистрационный № 20700).