



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.
Носова»



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИЭиАС
В.Р. Храмшин

04.02.2025 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

МАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Направление подготовки (специальность)
11.03.04 Электроника и микроэлектроника

Направленность (профиль/специализация) программы
Интернет вещей в промышленной электронике

Уровень высшего образования - бакалавриат

Форма обучения
очная

Институт/ факультет	Институт энергетики и автоматизированных систем
Кафедра	Электроники и микроэлектроники
Курс	4
Семестр	7

Магнитогорск
2025 год

Рабочая программа составлена на основе ФГОС ВО - бакалавриат по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника (приказ Минобрнауки России от 19.09.2017 г. № 927)

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры Электроники и микроэлектроники

15.01.2025, протокол № 5

Зав. кафедрой



Д.Ю. Усатый

Рабочая программа одобрена методической комиссией ИЭиАС
04.02.2025 г. протокол № 3

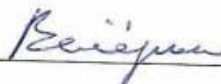
Председатель



В.Р. Храмшин

Рабочая программа составлена:

доцент кафедры ЭиМЭ, к.т.н.



Вечёркин М.В.

Рецензент:

директор сервисного центра ООО «Техноап-Инжиниринг», к.т.н.



Сусицын Е.С.

Лист актуализации рабочей программы

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2026 - 2027 учебном году на заседании кафедры Электроники и микроэлектроники

Протокол от _____ 20__ г. № ____
Зав. кафедрой _____ Д.Ю. Усатый

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2027 - 2028 учебном году на заседании кафедры Электроники и микроэлектроники

Протокол от _____ 20__ г. № ____
Зав. кафедрой _____ Д.Ю. Усатый

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2028 - 2029 учебном году на заседании кафедры Электроники и микроэлектроники

Протокол от _____ 20__ г. № ____
Зав. кафедрой _____ Д.Ю. Усатый

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2029 - 2030 учебном году на заседании кафедры Электроники и микроэлектроники

Протокол от _____ 20__ г. № ____
Зав. кафедрой _____ Д.Ю. Усатый

1 Цели освоения дисциплины (модуля)

Целью преподавания дисциплины «Магнитные элементы электронных устройств» является подготовка высококвалифицированного бакалавра по направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», способного разрабатывать структурные и функциональные схемы электронных систем и комплексов, принципиальных схем устройств, содержащих магнитные элементы с использованием средств компьютерного проектирования, проведением проектных расчетов и технико-экономическим обоснованием принимаемых решений.

Достижение цели требует решения следующих основных задач:

- формирование у студентов теоретических основ магнитных явлений и магнитных свойств материалов;
- усвоения принципов функционирования, конструкций и основных характеристик магнитных элементов;
- изучение принципов построения типовых электронных узлов с использованием магнитных элементов;
- формирование знаний и навыков по использованию современных магнитных элементов, узлов и устройств для решения практических задач.

2 Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина Магнитные элементы электронных устройств входит в часть учебного плана формируемую участниками образовательных отношений образовательной программы.

Для изучения дисциплины необходимы знания (умения, владения), сформированные в результате изучения дисциплин/ практик:

Физические основы электроники

Физика

Математика

Теоретические основы электротехники

Знания (умения, владения), полученные при изучении данной дисциплины будут необходимы для изучения дисциплин/практик:

Основы проектирования электронной компонентной базы

Технологические датчики

Силовая электроника

3 Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины (модуля) и планируемые результаты обучения

В результате освоения дисциплины (модуля) «Магнитные элементы электронных устройств» обучающийся должен обладать следующими компетенциями:

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции
ПК-1	Способен разрабатывать структурные и функциональные схемы электронных систем и комплексов, принципиальных схем устройств с использованием средств компьютерного проектирования, проведением проектных расчетов и технико-экономическим обоснованием принимаемых решений
ПК-1.1	Разрабатывает эскизный проект, включающий: выбор структурной схемы электронного устройства или системы путем сопоставления различных вариантов и их оценки с точки зрения технических и экономических требований; рассчитывает все необходимые показатели структурной схемы электронного устройства или системы, в том числе показатели качества; выбирает и обосновывает схемы вспомогательных устройств
ПК-1.2	Производит технико-экономическое обоснование принятого

	решения с расчетами себестоимости устройства и стоимости его эксплуатации; сравнивает с аналогами по технико-экономическим характеристикам
--	--

4. Структура, объём и содержание дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единиц 108 академических часов, в том числе:

- контактная работа – 37 академических часов;
- аудиторная – 36 академических часов;
- внеаудиторная – 1 академический час;
- самостоятельная работа – 71 академический час;
- в форме практической подготовки – 0 академических часов;

Форма аттестации - зачет

Раздел/ тема дисциплины	Семестр	Аудиторная контактная работа (в академических часах)			Самостоятельная работа студента	Вид самостоятельной работы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации	Код компетенции
		Лек.	лаб. зан.	практ. зан.				
1. Основы теории магнетизма								
1.1 Свойства и характеристики магнитного поля. Магнитный момент. Намагниченность. Магнитная восприимчивость. Магнитная проницаемость.	7	1			4	Самостоятельное изучение учебной литературы.	Устный опрос.	ПК-1.1
1.2 Классификация веществ по магнитным свойствам: диамагнетики; парамагнетики; ферромагнетики; антиферромагнетики; ферримагнетики.		1			2	Самостоятельное изучение учебной литературы.	Устный опрос.	ПК-1.1
1.3 Свойства и характеристики ферромагнитных материалов. Магнитный домен. Кривая намагничивания. Магнитный гистерезис и предельная петля гистерезиса: индукция насыщения; коэрцитивная сила; остаточная индукция.		1	2		4	Подготовка к выполнению лаб. работы. Составление конспекта. Составление отчета по лаб. работе.	Устный опрос. Проверка конспекта. Проверка отчета по лаб. работе.	ПК-1.1, ПК-1.2
1.4 Потери энергии в ферромагнетиках: потери на гистерезис; потери на вихревые токи.		1	2		5	Самостоятельное изучение учебной литературы. Подготовка к защите темы.	Устная защита темы.	ПК-1.1, ПК-1.2

1.5 Виды магнитной проницаемости. Зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности поля и ее связь с кривой намагничивания.	7	1			4	Самостоятельное изучение учебной литературы.	Устный опрос.	ПК-1.1, ПК-1.2
Итого по разделу		5	4		19			
2. Магнитные материалы								
2.1 Классификация магнитных материалов по химическому составу, внутреннему строению и электрическим свойствам. Группы магнитных материалов: магнитомягкие; магнитотвердые; специального назначения.	7	1	1		6	Самостоятельное изучение учебной литературы.	Устный опрос. Проверка индивидуальных заданий.	ПК-1.1, ПК-1.2
2.2 Требования к магнитомягким материалам в низкочастотных магнитных полях. Основные свойства магнитомягких ферромагнитных материалов.		2	1		8	Самостоятельное изучение учебной литературы. Подготовка к защите темы.	Проверка индивидуальных заданий. Устная защита темы.	ПК-1.1, ПК-1.2
Итого по разделу		3	2		14			
3. Магнитные элементы и устройства РЭА								
3.1 Катушка индуктивности и дроссели. Конструкция, классификация, основные характеристики. Собственная емкость катушки и способы её уменьшения. Добротность катушки и способы её повышения.	7	2	2		6	Самостоятельное изучение учебной литературы.	Устный опрос. Проверка индивидуальных заданий.	ПК-1.1, ПК-1.2
3.2 Упрощенный расчет индуктивностей цилиндрической, тороидальной и плоской катушек. Расчет дросселя переменного тока и сглаживающего дросселя.		1	2		6	Самостоятельное изучение учебной литературы.	Устный опрос. Проверка индивидуальных заданий.	ПК-1.1, ПК-1.2
3.3 Трансформаторы электропитания и сигнальные трансформаторы. Классификация по различным признакам. Основные характеристики.		2	4		6	Подготовка к выполнению лаб. работы. Составление конспекта. Составление отчета по лаб. работе.	Устный опрос. Проверка конспекта. Проверка отчета по лаб. работе.	ПК-1.1, ПК-1.2
3.4 Классификация режимов работы трансформаторов. Формулы		2	2		10	Самостоятельное изучение учебной литературы.	Устная защита темы.	ПК-1.1, ПК-1.2

<p>трансформаторных ЭДС. Расчет числа витков обмоток. Формулы габаритной мощности. Расчет понижающего трансформатора линейного источника электропитания. Расчета трансформатора однофазного прямоходового преобразователя, двухфазного мостового преобразователя, однофазного обратходового преобразователя.</p>						Подготовка к защите темы.		
<p>3.5 Индуктивные измерительные преобразователи. Трансформаторные измерительные преобразователи. Электромагнитные реле.</p>	7	3	2		10	Самостоятельное изучение учебной литературы.	Устный опрос. Проверка индивидуальных заданий.	ПК-1.1, ПК-1.2
Итого по разделу		10	12		38			
Итого за семестр		18	18		71		зачёт	
Итого по дисциплине		18	18		71		зачет	

5 Образовательные технологии

Для освоения дисциплины «Магнитные элементы электронных устройств» используются преимущественно традиционные образовательные технологии.

Информационные лекции – для изложения основных теоретических понятий, законов и принципов описания физических процессов,

Лабораторные занятия – для усвоения и закрепления навыков проведения экспериментальных исследований реальных физических объектов и их моделей, а также обработки результатов эксперимента.

Для повышения информационной насыщенности наряду с информационной лекцией используются лекции-визуализации, а также практические занятия в форме презентации.

6 Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Представлено в приложении 1.

7 Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

Представлены в приложении 2.

8 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) Основная литература:

1. Сорокин, В. С. Материалы и элементы электронной техники. Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники. Том 2 : учебник для вузов / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева. — 4-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2024. — 380 с. — ISBN 978-5-507-47708-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/407759> (дата обращения: 13.04.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

2. Лунин, В. П. Электротехника и электроника в 3 т. Том 1. Электрические и магнитные цепи : учебник и практикум для вузов / В. П. Лунин, Э. В. Кузнецов ; под общей редакцией В. П. Лунина. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 255 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-00356-7. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/536484> (дата обращения: 13.05.2024).

3. Маклиман, В. Проектирование трансформаторов и дросселей. Справочник: справочник / В. Маклиман. — 3-е изд. — Москва: ДМК Пресс, 2016. — 476 с. — ISBN 978-5-97060-165-5. — Текст : электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/90127> (дата обращения: 08.09.2020) — Режим доступа: для авто-риз. пользователей.

б) Дополнительная литература:

1. Воронин, А. И. Трансформаторы и дроссели источников питания электронных устройств: учебное пособие / А. И. Воронин, Г. А. Шадрин. — Москва: ТУСУР, 2009. — 145 с. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/10935> (дата обращения: 08.09.2020) — Режим доступа: для авто-риз. пользователей.

2. Ерсос: индуктивные компоненты . — Москва: ДМК Пресс, 2010. — 62 с. — ISBN 978-5-94120-067-6. — Текст : электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/60957> (дата обращения: 08.09.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

3. Легостаев, Н. С. Материалы электронной техники: учебное пособие / Н. С. Легостаев. — Москва: ТУСУР, 2014. — 239 с. — ISBN 978-5-86889-679-8. — Текст : электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL:

<https://e.lanbook.com/book/110346> (дата обращения: 08.11.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

4. Онлайн-калькулятор для расчета катушек индуктивности – URL:
<https://coil32.ru/calculate-on-line.html>

в) Методические указания:

1. Дубский, Г. А. Физика конденсированного состояния вещества [Электронный ре-сурс]: лабораторный практикум / Г. А. Дубский, А. А. Нефедьев, Т. Я. Дубская ; МГТУ. - [2-е изд., подгот. по печ. изд. 2014 г.]. - Магнитогорск : МГТУ, 2015. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - Режим доступа:
<https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=1445.pdf&show=dcatalogues/1/1123966/1445.pdf&view=true>.

г) Программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

Программное обеспечение

Наименование ПО	№ договора	Срок действия лицензии
7Zip	свободно распространяемое ПО	бессрочно
Браузер Yandex	свободно распространяемое ПО	бессрочно
Adobe Reader	свободно распространяемое ПО	бессрочно
MathCAD v.15 Education University Edition	Д-1662-13 от 22.11.2013	бессрочно
NI MultiSim Education	К-68-08 от 29.05.2008	бессрочно

Профессиональные базы данных и информационные справочные системы

Название курса	Ссылка
Российская Государственная библиотека. Каталоги	https://www.rsl.ru/ru/4readers/catalogues/
Электронные ресурсы библиотеки МГТУ им. Г.И. Носова	https://host.megaprolib.net/MP0109/Web
Национальная информационно-аналитическая система – Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)	URL: https://elibrary.ru/project_risc.asp

9 Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Материально-техническое обеспечение дисциплины включает:

Материально-техническое обеспечение дисциплины включает:

Лекционная аудитория ауд. 459 Мультимедийные средства хранения, передачи и представления информации.

Лаборатория ауд. 459 Лабораторные стенды с комплектом лабораторных работ по магнитным элементам электронных устройств.

Компьютерные классы Центра информационных технологий ФГБОУ ВО «МГТУ» и специализированная ауд. 343 Персональные компьютеры, объединенные в локальные сети с выходом в Internet, оснащенные современными программно-методическими комплексами для решения задач в области моделирования процессов перемагничивания ферромагнитных материалов.

Учебные аудитории для проведения практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации Интерактивная доска, проектор;

Мультимедийный проектор, экран.

Учебные аудитории для выполнения курсового проектирования, помещения для самостоятельной работы. Персональные компьютеры с пакетом MS Office, с выходом в Интернет и с доступом в электронную информационно-образовательную среду университета.

Помещение для хранения и профилактического обслуживания учебного оборудования Стеллажи, сейфы для хранения учебного оборудования. Инструменты для ремонта оборудования.

Аудитории для самостоятельной работы с выходом в Интернет и с доступом в электронную информационно-образовательную среду университета.

Компьютерные классы, включающие персональные компьютеры с пакетом MS Office, MathCAD, Scilab; читальные залы библиотеки

Аудитории для групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации Персональные компьютеры с пакетом MS Office, MathCAD, Scilab и выходом в Интернет.

6 Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

По дисциплине «Магнитные элементы электронных устройств» предусмотрена аудиторная и внеаудиторная самостоятельная работа обучающихся. Аудиторная самостоятельная работа студентов предполагает выполнение и защиту лабораторных работ, решение контрольных задач.

Перечень лабораторных работ:

1. Изучение петли гистерезиса и кривой намагничивания ферромагнетика.
2. Изучение трансформатора тока.
3. Снятие АЧХ и ЛАЧХ сигнального трансформатора.

Вопросы к защитам тем

Тема 1

1. Что такое магнитное поле? Чем оно создается и как обнаруживается?
2. Что характеризуют напряженность и индукция магнитного поля? Как они обозначаются и в чем они измеряются?
3. Что принимают за направление магнитного поля в данной точке?
4. Что такое магнитный момент? Какова его размерность?
5. Что характеризует намагниченность вещества? Как она определяется и в чем измеряется?
6. Как связаны намагниченность и напряженность магнитного поля?
7. Что характеризует магнитная восприимчивость? Какова её размерность?
8. Как связаны индукция и напряженность магнитного поля?
9. Что характеризует относительная магнитная проницаемость? Какова её размерность?
10. Как связаны магнитная проницаемость и магнитная восприимчивость?

Тема 2

1. По каким признакам классифицируются магнитные вещества? Перечислите пять групп магнетиков.
2. В чем заключается диамагнитный эффект? Что такое диамагнетик? Как в диамагнетике соотносятся индукции внешнего и собственного магнитного поля? Какие вещества относятся к диамагнетикам?

3. В чем заключается парамагнитный эффект? Что такое парамагнетик? Как в парамагнетике соотносятся индукции внешнего и собственного магнитного поля? Какие вещества относятся к парамагнетикам?
4. В чем заключается ферромагнитный эффект? Что такое ферромагнетик? Как в ферромагнетике соотносятся индукции внешнего и собственного магнитного поля? Какие вещества относятся к ферромагнетикам?
5. В чем заключается ферримагнитный эффект? Что такое ферримагнетик? Как в ферримагнетике соотносятся индукции внешнего и собственного магнитного поля? Какие вещества относятся к ферримагнетикам?
6. Как связаны намагниченность и напряженность магнитного поля?
7. Что такое точка Кюри? Что такое точка Нееля?
8. Какие материалы относят к слабомагнитным? Какие к сильномагнитным?

Тема 3

1. Назовите основные особенности ферромагнетиков.
2. Что такое магнитный домен?
3. Какими способами можно размагнитить магнитный материал?
4. Что такое основная кривая намагничивания?
5. Приведите характерный вид кривой намагничивания ферромагнетиков. Выделите характерные участки кривой. Опишите механизм намагничивания на каждом участке.
6. В чем заключается явление магнитного гистерезиса? Приведите характерный вид предельной петли гистерезиса ферромагнетиков.
7. Раскройте смысл понятий: индукция насыщения, коэрцитивная сила, остаточная индукция. Как эти параметры могут быть определены по петле гистерезиса?
8. Из чего складываются потери энергии при перемагничивании ферромагнетиков?
9. Как определить потери на перемагничивание с помощью статической петли гистерезиса?
10. Как зависят потери на вихревые токи от частоты перемагничивания?
11. Что такое магнитная проницаемость? Перечислите виды магнитной проницаемости?
12. Приведите кривую зависимости магнитной проницаемости от напряженности поля. Укажите характерные точки.

Тема 4

1. По какому признаку магнитные материалы подразделяются на магнитомягкие и магнитотвердые?
2. Каковы общие требования к магнитным материалам электронной техники?

3. Перечислите магнитные элементы, применяемые в электронной технике.
4. Что такое катушка индуктивности? Из чего она состоит?
5. Что такое магнитный поток (формула)? Потокосцепление (формула)?
6. Что такое индуктивность (формула)? В чем она измеряется?
7. От чего зависит значение индуктивности катушки?
8. Назовите три типа катушек индуктивности по форме обмотки. Зарисуйте их вид.
9. Приведите приближенные формулы для нахождения индуктивности каждого типа катушки.
10. Что такое собственная емкость катушки? Из каких составляющих она складывается?
11. Приведите эквивалентную схему замещения катушки с учетом собственной емкости, активного сопротивления обмотки и активного сопротивления изоляции.
12. Опишите способы снижения собственной емкости катушек. Объясните их принцип.
13. Что такое добротность катушки индуктивности? В чем она измеряется?
14. Перечислите пути увеличения добротности катушек индуктивности. Объясните их принцип.
15. Что такое дроссель? Перечислите типы дросселей.
 16. Приведите упрощенный порядок расчета дросселя переменного тока.

Тема 5

1. Что такое трансформатор? Что такое силовой трансформатор?
2. Приведите эквивалентную схему однофазного двухобмоточного трансформатора и прокомментируйте ее.
3. По каким признакам классифицируются трансформаторы?
4. Приведите изображения стрержневого, броневое и кольцевого магнитопровода трансформаторов. Каковы преимущества и недостатки каждого из них?
5. В чем различия, преимущества и недостатки ленточных и пластинчатых магнитопроводов?
6. Что такое электромагнитная мощность трансформатора? выходная мощность трансформатора?
8. Что такое габаритная мощность трансформатора? Почему она так называется?
9. Что такое КПД трансформатора?
10. Что такое коэффициент трансформации трансформатора?
11. Из чего складывается ток холостого хода трансформатора?

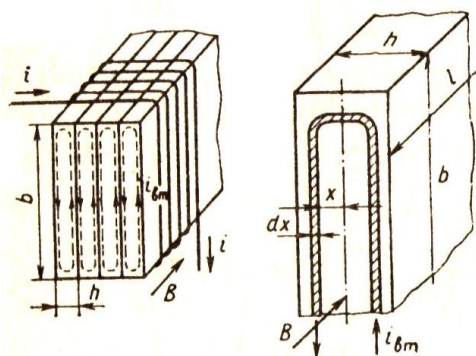
12. Приведите эквивалентную схему замещения однофазного двухобмоточного трансформатора. Прокомментируйте назначение каждого элемента схемы. Приведите математические соотношения, описывающие ее работу.

13. Приведите упрощенный порядок расчета низковольтного двухобмоточного понижающего трансформатора.

Типовая практическая задача

Определить удельные магнитные потери на вихревые токи в сердечнике дросселя, набранном из листов электротехнической стали толщиной 0,35 мм, если на сердечник воздействует изменяющийся по синусоидальному закону магнитный поток с частотой 50 Гц и максимальной индукцией 0,5 Тл. Удельное сопротивление стали 0,5 мкОм·м.

Вихревые токи $i_{вт}$ возникают в плоскости, расположенной перпендикулярно вектору магнитной индукции \mathbf{B} . В сборном сердечнике тонкий лист длиной l , высотой b и толщиной h пронизывается магнитным потоком, направленным вдоль плоскости листа. Выделим в теле листа полый цилиндр с основанием, ограниченным двумя контурами вихревого тока.



Большие стороны этих контуров отстоят от вертикальной оси сечения листа соответственно на x и $x+dx$. Так как $h \ll b$, то можно считать, что длина большой стороны контура вихревого тока равна толщине листа b . Тогда магнитный поток, пронизывающий полость цилиндра

$$\Phi_x = 2xbB.$$

Действующее значение ЭДС, индуцируемой переменным током в стенке цилиндра,

$$U_x = \omega \Phi_x = 4\pi fxbB = 4\pi fxb \frac{B_m}{\sqrt{2}}.$$

Потери на вихревые токи в цилиндре

$$dP_{em} = U_x^2 d\sigma_x$$

где $d\sigma_x$ – активная проводимость выделенного цилиндра.

Учитывая, что поперечное сечение цилиндра для вихревого тока равно ldx , для проводимости цилиндра получим

$$d\sigma_x = \frac{l dx}{2b\rho}.$$

Отсюда следует, что

$$dP_{\text{эм}} = \frac{U_x^2 l}{2b\rho} dx = \frac{4\pi^2 f x^2 b l B_m^2}{\rho} dx.$$

Мощность, выделяемую за счет протекания вихревых токов во всем листе, найдем как сумму элементарных мощностей, создаваемых всеми контурами вихревых токов.

Интегрируя, получим

$$P_{\text{эм}} = \frac{4\pi^2 f x^2 b l B_m^2}{\rho} \int_0^{h/2} x^2 dx = \frac{\pi^2 B_m^2 h^3 b l f}{6 \rho} = 1,643 f B_m^2 h^2 \frac{V}{\rho}.$$

где $V = hbl$ – объем листа.

Таким образом, удельные потери на вихревые токи в сердечнике:

$$P_{\text{эм}} = \frac{1,643 f B_m^2 h^2}{\rho} = 5 \text{ Вт/м}^3.$$