

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
«МЭИ»**

Институт ИРЭ ЭТФ Кафедра Светотехника
Направление Электроника и нанoeлектроника

**ЗАДАНИЕ НА МАГИСТЕРСКУЮ
ДИССЕРТАЦИЮ**

по программе подготовки магистров Теоретическая и
прикладная светотехника 210100

Тема: «Расчет зависимостей мощности потерь в ВЧ индукторе лампы трансформаторного типа от конструктивных параметров лампы»

Время выполнения работы с 1 октября 2013 по 15 июня 2014

Студентка Толстова Т.Ю. ЭР-04-08
Фамилия, и., о. группа подпись

Научный руководитель д.т.н. Попов О.А.
должность, звание, фамилия, и., о. подпись

Консультант _____
должность, звание, фамилия, и., о.

Зав. кафедрой к.т.н. Боос Г. В.
звание, фамилия, и., о., подпись, дата утверждения задания

Место выполнения научной работы НИУ «МЭИ» (ТУ) кафедра «Светотехника»

Москва

«_____» _____ 2014 г.

1.Обоснование выбора темы диссертационной работы

В данный момент проблема энергосбережения стоит очень остро. Одним из способов ее уменьшения является уменьшение электроэнергии, идущей на освещение. Для этого идет разработка новых источников света и совершенствование уже существующих. К новым источникам света, которые начали выпускаться промышленностью не так давно – в начале 2000ых годов – относятся исследуемые в настоящей работе лампы трансформаторного типа с магнитопроводом. Эти лампы за счет отсутствия электродов обладают большим сроком службы, намного превышающим этот показатель для традиционных источников света с электродами, а так же возможностью уменьшить давление инертного газа, что приводит к росту эффективности плазменного разряда.

Несмотря на то, что этот источник света имеет ряд неоспоримых преимуществ перед традиционными источниками света с электродами, тем не менее, имеется и ряд недостатков. Одним из таких недостатков являются потери в ферритовом магнитопроводе, что снижает эффективность такого рода ламп. На данный момент существует не так уж много работ, посвященных этой проблеме, что связано с относительной новизной этого источника света. Одной из таких работ является настоящая диссертация, в которой исследуется безэлектродная индукционная люминесцентная лампа трансформаторного типа. Рассматривается возможность уменьшения мощности потерь в ферритовом магнитопроводе и увеличения коэффициента полезного действия за счет изменения конструктивных параметров лампы.

Научный руководитель Попов О.А. _____ дата _____

Студентка Толстова Т.Ю. _____ дата _____

2.Консультации по разделу

Подпись консультанта _____ дата _____

3.Консультации по разделу

Подпись консультанта _____ дата _____

4. План работы над магистерской диссертацией

№ п\п	Содержание разделов	Срок выполнения	Трудоёмкость в %
I	Теоретическая часть Обзор тематической литературы	1.10.2013 – 1.03.2014	5%
II	Анализ существующих экспериментальных данных Сбор экспериментальных данных	1.02.2014- 1.03.2014	5%

	Непосредственный анализ результатов	1.03.2014- 1.04.2014	15%
III	Расчетная часть		
	Постановка задачи работы	5.04.2014 - 10.04.2014	10%
	Выбор необходимых данных для расчета	10.04.2014 – 20.04.2014	10%
	Вывод выражения, связывающего потери мощности в феррите с конструктивными параметрами лампы	15.04.2014- 5.05.2014	25%
	Анализ полученных данных	5.05.2014- 1.06.2014	20%
IV	Оформление диссертации		
	Написание и оформление диссертации.	1.05.2014 – 15.06.2014	10%

5. Рекомендуемая литература

1. О.А. Попов. Индукционные источники света//Учебное пособие. Издательский дом МЭИ. Москва. 2010. 64 стр.
2. О.А.Попов. Исследование и разработка индукционных люминесцентных источников света на частотах 100-15000 кГц // Докт. дисс. Москва. 2012. 450 стр.
3. Г.Н. Рохлин. Разрядные источники света, Москва, 1991. 720 стр.

6. Краткие сведения о студенте:

Домашний адрес Московская область, г. Балашиха, ул. Парковая, д.15, кв.36

Телефон служебный _____ домашний _____

Примечание: задание брошюруется вместе с диссертацией и с отзывами руководителя и рецензентов.

Содержание.

1. Введение	6
2. Литературный обзор	
2.1 История возникновения индукционных ламп	8
2.2 Современные БИЛЛ	11
2.3. Трансформаторная модель индукционного разряда	21
2.3.1 Электрическая схема индукционной плазмы	23
2.3.2. Эквивалентная схема индукционного разряда	24
3. Расчетная часть.	
3.1. Постановка задачи	
3.2. Соотношения, связывающие мощность потерь в ВЧ индукторе и КПД ВЧ индуктора с конструктивными параметрами разрядной колбы и внешними условиями.	28
3.2.1 Выбор материала ферромагнетика	33
3.3 Расчет потерь мощности в ферромагнетике	40
3.4. Влияние мощности лампы на P_{fer} и КПД ВЧ индуктора.	42
3.5. Влияние частоты на P_{fer} и КПД ВЧ индуктора.	46
3.6. Влияние сечения феррита на P_{fer} и КПД ВЧ индуктора.	53
3.7. Влияние диаметра разрядной трубки на P_{fer} и КПД ВЧ индуктора.	57
3.8. Влияние длины плазменного витка на P_{fer} и КПД ВЧ индуктора.	61
4. Заключение	67
5. Аннотация	68
6. Список литературы	69
7. Приложение	70

Список сокращений и обозначений:

ПРА – пускорегулирующий аппарат

ИС – источник света

ВЧ – высокая частота

ЛЛ- люминесцентная лампа

ИРТТ – индукционный разряд трансформаторного типа

НИРТТ – низкочастотный индукционный разряд трансформаторного типа

КПД – коэффициент полезного действия

УПЛ – узкополосный люминофор

БИЛЛ – безэлектродная индукционная люминесцентная лампа

1.ВВЕДЕНИЕ

Люминесцентные лампы с электродами наиболее популярны и применяются в наше время. Они имеют хорошие цветовые характеристики (широкий диапазон цветовой температуры 3000-6000К и высокий индекс цветопередачи порядка 60-90), высокие световые отдачи до 110 лм/Вт. Однако, наличие внутренних электродов вносит ограничения на конструкцию вакуумного блока, на высокие удельные мощности плазмы и на низкие давления инертного газа, на которых достигается максимальная световая отдача. С 80-х годов XX века ведется разработка безэлектродных люминесцентных источников света.

Индукционная лампа – источник света, принцип работы которого основан на электромагнитной индукции и газовом разряде для генерации видимого и ультрафиолетового излучения. Основным отличием от существующих газоразрядных ламп является безэлектродная конструкция - отсутствие термокатодов и нитей накала, что значительно увеличивает их срок службы.

Ультрафиолетовое излучение, генерируемое в плазме индукционного разряда, поглощается в слое люминофора, нанесенного на стенки газоразрядной колбы, и преобразуется в видимое излучение.[1] Важную роль в повышении конкурентоспособности индукционных ламп играет возможность снижения их себестоимости, веса, габаритов, а также простота и дешевизна технологического процесса их изготовления.

На сегодняшний день практически нет работ по исследованию влияния размеров лампы (диаметра трубки, ее длины и высоты), формы, структуры и размеров магнитопровода, давления буферного газа, частоты ВЧ поля на электрические, энергетические и светотехнические характеристики лампы. В частности, зависимостей мощности потерь в ВЧ индукторе от конструктивных параметров лампы. Это позволило бы находить для заданной мощности лампы оптимальные размеры трубки, магнитопровода и давление инертного газа, минимальные потери мощности в магнитопроводе.

В настоящей работе проведены теоретические исследования влияния параметров индукционной лампы трансформаторного типа: диаметра разрядной трубки, площади сечения магнитопровода, мощности лампы, длины плазменного витка и частоты – на мощность потерь в ВЧ индукторе.

2. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

2.1. История возникновения индукционных ламп

Исследование индукционного разряда с целью получения видимого излучения начали более 100 лет назад. Впервые безэлектродный разряд был экспериментально получен немецким ученым Иоханном Вильгельмом Хитторфом в 1884 году в стеклянной откаченной трубке с помощью индуктивной катушки, на которую он подал высокое напряжение от лейденской банки [2]. На протяжении последующих десятилетий ученые изучали безэлектродный разряд, предлагая различные механизмы его зажигания и поддержания. Одним из классиков в этой области считается Сэр Джон Томсон, заложивший основы теории электромагнитного возбуждения разряда в газах и получивший аналитические выражения, описывающие зажигание индуктивного разряда. Томсон считал электромагнитный метод возбуждения и поддержания безэлектродного разряда в лампах низкого и среднего давления основным и более «эффективным», нежели переменный «искровой». [2] Но уже через год Таунсенд и Дональдсон указали на важную роль электростатических сил в зажигании и поддержании разрядов в газах, возникающих в объеме колбы из-за значительной разницы потенциалов между концами соленоида, положив тем самым начало изучению емкостных разрядов. Обе эти работы дали толчок интенсивным экспериментальным и теоретическим исследованиям в 30-х годах прошлого столетия безэлектродных разрядов в лампах низкого давления, в которых рассматривались физические явления обоих типов разрядов (индукционного и емкостного), условия их совместного существования и переход одного разряда к другому. Среди теоретических работ тех лет следует отметить статью профессора Иллинойского университета Д. Тыкочинского-Тыкочинера, предложившего считать индукционный разряд как воздушный трансформатор, где первичной обмоткой является индуктивная катушка, а вторичной – виток плазмы, созданный индуцированным в разряженном газе (парах металла) вихревым (замкнутым) высокочастотным напряжением [1].

Первый патент на безэлектродную лампу был получен в 1907 году. Однако американец П.С. Хьюитт лишь предложил некоторое количество конструкций индукционных ламп, наполненных парами ртути. Но лишь в 30-х годах появились реализуемые патенты индукционных ламп как источников излучения.

В 1936 году Жозеф Бетенод и Андре Клод предложили конструкцию индукционной лампы, основными компонентами которой являлись сферическая колба с вогнутой полостью, индуктивная катушка и ферромагнитный сердечник, усиливающий магнитное поле, генерируемое высокочастотным током катушки. Авторы патента предложили два варианта лампы: а) индуктивная катушка и сердечник помещены в полость; б) сердечник помещен в полость, а катушка обмотана вокруг лампы в области расположения полости (Рис.2-1).

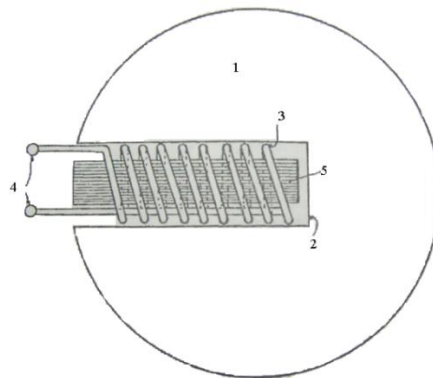


Рис. 2-1. Безэлектродная лампа Ж. Бетенода и А. Клода [13]. 1 – колба; 2- цилиндрическая полость; 3 – индуктивная катушка; 4 – клеммы; 5 – ферромагнитный сердечник

Другой тип индукционной лампы был предложен в 1968 году Джоном Андерсоном из General Electric [3,4]. Источник света включал в себя преобразователь промышленной частоты 60 Гц в 200 кГц (конвертор) и разрядную замкнутую трубку (рис. 2-2). Для передачи ВЧ мощности в разряд использовалась индуктивная катушка и замкнутый кольцевой ферромагнитный

магнитопровод, образующие ВЧ индуктор лампы. В дальнейшем лампы такого типа получили название «лампы трансформаторного типа». Главной технической задачей Андерсона было получение высокой энергетической эффективности лампы и минимизация потерь в магнитопроводе. Поэтому он работал на достаточно высоких частотах 100-200 кГц, где магнитная индукция в сечении магнитопровода значительно ниже, чем на частотах 1-10 кГц, а следовательно, меньше потери мощности в нем. Андерсон исследовал влияние материала магнитопровода на электрические и энергетические характеристики лампы; им была получена зависимость потерь мощности в магнитопроводе от частоты ВЧ поля для различных ферромагнетиков и сняты ВАХ лампы.

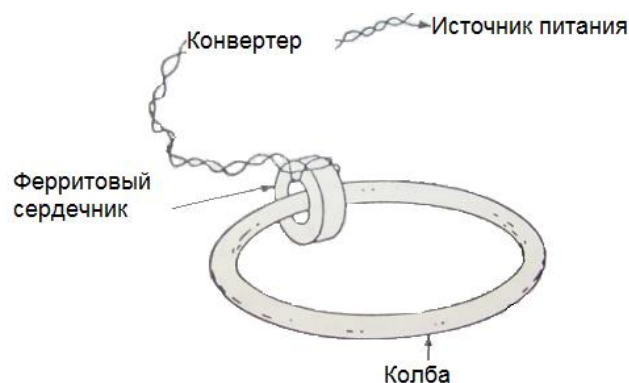


Рис. 2-2 Схематический эскиз лампы Андерсона

Разрядные трубки были диаметром 8-12 мм, а длина замкнутого плазменного витка, заполнявшего всю трубку составляла 88 см. Давление паров ртути - 1 Па, и инертного газа (аргона) – 150-300 Па. При работе лампы на частоте 400 кГц и мощности 60 Вт ВЧ напряжение на лампе $V_2 = 60$ В, что соответствовало напряженности ВЧ поля в плазме $E = 0.9$ В/см. Потери мощности в магнитопроводе составляли 30-40 Вт, что составляло более 50% от мощности лампы и потому было неприемлемо для разработчиков источников света, и исследования возможности использования ламп трансформаторного типа были фактически «заморожены». Они возобновились лишь в середине 90-х годов XX

века сотрудником компании Осрам/Сильвания (США), выходцем из Советского Союза В.А. Годяком.

В 1983 году на международном симпозиуме по источникам света фирмой General Electric была представлена безэлектродная люминесцентная лампа для замены лампы накаливания. Ее мощность составляла 39 Вт, из которых 3 Вт потреблялись ферритовым сердечником. Лампа работала на частоте 100 кГц и давала 2000 лм светового потока. Ее световая отдача была 50 лм/Вт, а спад светового потока составлял 25% после 16 тысяч часов горения. Но, к сожалению, эти разработки в то время не использовались в коммерческих целях, причиной тому было недостаточное понимание физики ВЧ разряда, а также отсутствие технологий для массового производства ламп такого типа с хорошими характеристиками и недорогой ценой.

2.2 Современные безэлектродные индукционные люминесцентные лампы (БИЛЛ)

Сегодня на международном рынке существует 5 типов БИЛЛ: Everlight (Matsushita), QL induction (Philips), Genura (General Electric), Endura (Osram/Sylvania). Эти лампы соединили в себе последние достижения в области изучения физики газового разряда, твердого тела, материаловедения и электроники, что позволило перейти от лабораторных образцов к конечному коммерческому продукту.

Промышленный выпуск безэлектродных ламп начался в последнем десятилетии прошлого века. В 1991 году фирма Philips представила свою QL lamp system. Сначала ассортимент QL ламп состоял из двух мощностей: 55 Вт (световой поток 3500 лм, световая отдача 63 лм/Вт) и 85 Вт (5500±500 лм, 65 лм/Вт соответственно), а с 1997 года начал выпуск более мощной лампы в 165 Вт. Средний срок службы ламп QL и общий вид системы представлены на Рис.(2-3). Лампа работает на частоте 2,65 МГц. Катушка расположена на оси колбы, в специальной полости. Колба по форме соответствует лампе накаливания, на ее внутренней (вакуумной) поверхности нанесено защитное

покрытие, поверх которого наложен люминофор, он нанесен и на вакуумную поверхность стенок.



Рис. 2-3. Компоненты индукционного источника света QL 55

Эти лампы наполнены аргоном с давлением 0,25 мм.рт.ст., и парами ртути, давление которых контролируется двумя амальгамами: одна для зажигания лампы, другая для хранения оптимального давления в широком диапазоне температуры окружающей среды в процессе работы лампы. Недостатки характеристик источников света серии QL связаны с относительно высокой рабочей частотой источника питания $f = 2,65$ МГц:

1) Плазма индуктивного разряда создает высокий уровень ВЧ шумов. Для их снижения применяются либо отражающие покрытия на стенках колбы, либо заземленные металлические полосы, нанесенные на атмосферную поверхность стенок колбы. В обоих случаях снижается световой поток лампы.

2) К проводу, соединяющему ВЧ индуктор с ЭПРА, предъявляются жесткие требования: он должен быть коаксиальным ВЧ кабелем (50 или 75 Ом) с длиной не превышающей 0,5 м.

3) Электрические, а следовательно, и светотехнические характеристики лампы, работающей на частоте 2,65 МГц, весьма чувствительны к конструкции и размерам светильника, изготовленного из токопроводящего материала.

4) К.п.д. генератора мощности на частоте 2,65 МГц на мощностях 55 – 165 Вт не превышает 0,88, что снижает к.п.д. всей системы и световую отдачу лампы.[2]

В 1994 году компанией General Electric была создана компактная БИЛЛ Genura, в цоколе которой был размещен ВЧ генератор (Рис1-4).[3] Мощность лампы 23 Вт, рабочая частота 2,5 МГц, наполнение аргон и пары ртути, световой поток 1100 лм, световая отдача 47 лм/Вт. Средний срок службы 10000 часов. Лампа предназначена для замены лампы накаливания мощностью 100 Вт со стандартным цоколем E27. Использование этой лампы дает экономию электроэнергии в 4-5 раз и повышает продолжительность эксплуатации лампы в 10-15 раз. Недостатком лампы является довольно высокая стоимость, однако уже через 8 месяцев эксплуатации лампа полностью себя окупает.

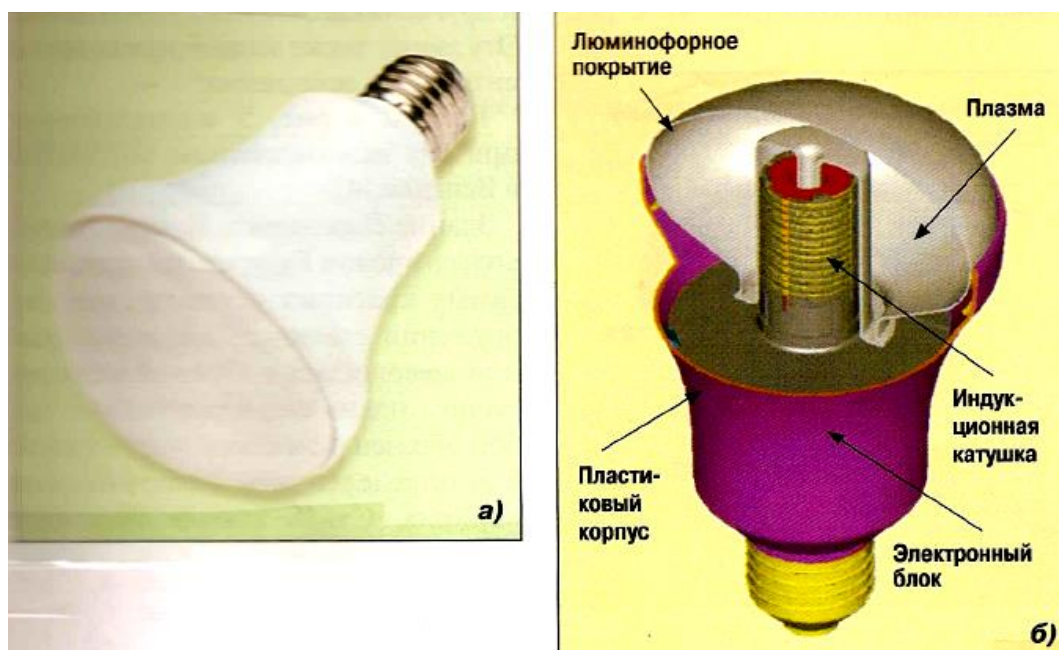


Рис. 2-4 Компактная индукционная лампа Genura (а) и ее схематический чертеж (б)

Безэлектродная индукционная люминесцентная лампа, патент на которую был получен в 1998 г. В.А. Годяком, состоит из замкнутой трубки, двух симметрично расположенных на трубке ферромагнитных магнитопроводов и последовательно соединенных двух индуктивных катушек, каждая охватывающая «свой» магнитопровод [8]. Такие лампы получили название

лампы трансформаторного типа. Один из ее вариантов дан на рис 1-5, где общая катушка (первичная обмотка трансформатора) охватывает оба магнитопровода и расположена на «внутренней» стороне лампы [2]. Лампы работают на частотах 100-600 кГц и мощности 50-250 Вт. Потери мощности в магнитопроводах составляют 6-8 Вт. При работе лампы на частоте 200-300 кГц и мощности лампы 140 -150 Вт световой поток лампы равен 12 500 лм и световая отдача составляет 87 лм/Вт. Существенное повышение энергоэффективности и светоотдачи лампы было достигнуто Годяком и его соавторами за счет увеличения тока разряда примерно от 0,5 до 5 А при мощности от 40 Вт до 150 Вт. Существенно сократились потери мощности в магнитопроводе $P_{\text{пот}}$ от 11-18 Вт до 3-7 Вт. Таким образом, энергетическая эффективность лампы при работе на 150 Вт была увеличена до 95%, а световая отдача была увеличена до 94 лм/Вт.

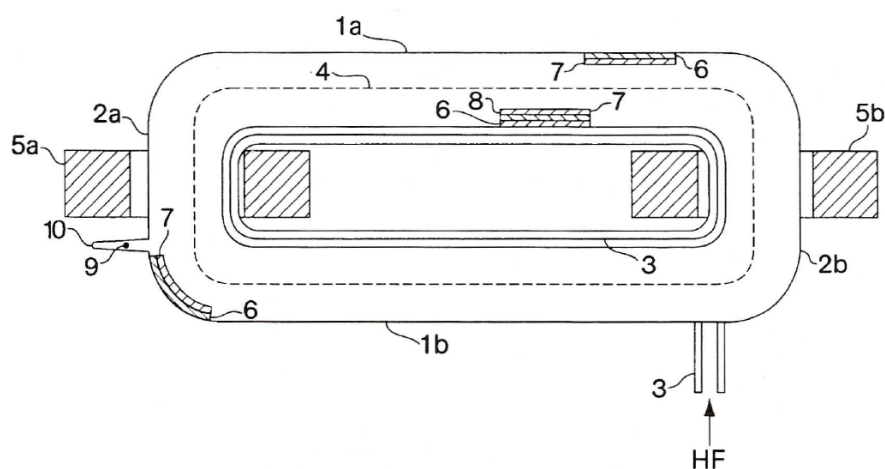


Рис. 2-5. Эскиз лампы трансформаторного типа с симметрично размещенными магнитпроводами. 1a,b – стенки разрядных трубок; 2a,b – стенки соединительных трубок; 3 – индуктивная катушка; 4- ось разряда; 5a,b – магнитопроводы; 6 – защитное покрытие; 7- люминофорный слой; 8- отражающее видимый свет покрытие; 9 – амальгама (или жидкая ртуть); 10 – штенгель; HF – напряжение высокой частоты.

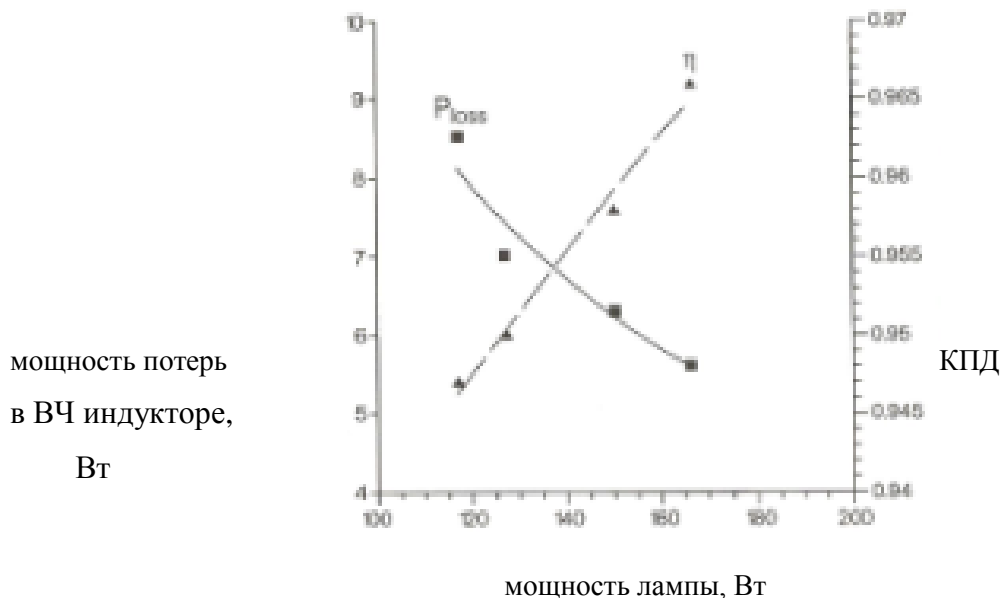


Рис. 2-6. Зависимости потерь мощности в ВЧ-индукторе и КПД от мощности лампы [8].

С ростом мощности лампы, как видно из рис. 1-6, потери мощности в ВЧ индукторе падают с 8 Вт на $P_{л} = 115$ Вт до 5,5 Вт на $P_{л} = 165$ Вт. На частоте 300 кГц и мощности лампы от 120-170 Вт, ток катушки равен 1,8-2,5 А. Таким образом, потери мощности в проводе катушки, $P_{кат} = I_c^2 R_c = 0,2-0,3$ Вт, что составляет менее 5% от общей потери мощности катушки /феррита 5-8 Вт (Рис. 1-6). А КПД ВЧ индуктора η , увеличивается с 95% при $P_{л} = 120$ Вт до 97% при $P_{л} = 170$ Вт.

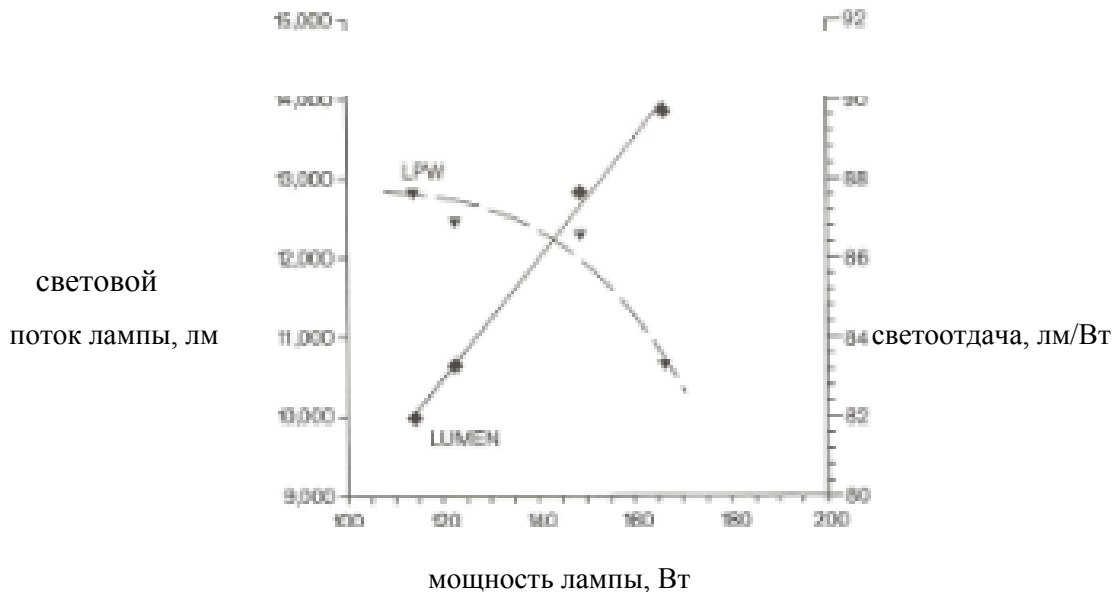


Рис. 2-7. Зависимости светового потока лампы и световой отдачи лампы от мощности лампы

Выходной световой поток лампы и световой отдаче в зависимости от мощности лампы приведены на рис. 1-7. Лампы работают на частоте 300 кГц. Видно, что поток лампы увеличивается от 10 000 люмен на 114 Вт до 14 000 люмен на 166 Вт. Световая отдача лампы примерно равна 87 лм/Вт при $P_{л} = 110-150$ Вт, а затем уменьшается с ростом $P_{л}$. Анализ ламп, приведенный в работе показывает, что грамотный выбор разрядного тока оказывает существенное влияние на потери в ферритовом сердечнике при зажигании разряда. Так например, увеличение разрядного тока от 0,5А до 5 А обеспечивает понижение потерь в сердечнике в 30 раз. Желательно, чтобы давление паров ртути и буферного газа было меньше, чем 0,5 торр. [7]

В конце 90-х фирма Osram освоила выпуск ламп Endura. Лампа представляет собой замкнутую трубку, изогнутую в виде прямоугольника. В коротких участках прямоугольника расположены два индуктора с ферритовыми кольцами (Рис.2-8). По принципу действия и внешнему виду эти лампы схожи с лампами Андерсона, которые оказались неэффективными из-за больших потерь в ферромагнитном магнитопроводе, однако, правильным выбором тока лампы Endura ее разработчикам удалось добиться уменьшения потерь.



Рис. 2-8. Индукционная лампа трансформаторного типа модели Endura

100 Вт лампа имела световой поток 8000 лм и световую отдачу 80 лм/Вт. Срок службы 60 тысяч часов [3]. Снижение потерь в магнитопроводе было достигнуто [2] следующим образом:

- выбором оптимального сочетания давления буферного газа (криптон 0,25 мм рт.ст.) и радиуса разрядной трубки ($R = 54$ мм); при таком (pR) в плазме индуктивного разряда устанавливалась низкая напряженность электрического поля E_{pl} , обеспечивающая малое напряжение на катушке индуктивности и, соответственно, низкое магнитное поле в магнитопроводе, а значит и низкие потери мощности в ферромагнитном магнитопроводе;
- высоким уровнем мощности, поглощаемой индуктивной плазмой в лампе, т.е. большим разрядным током, что существенно снизило электрическое поле плазмы E_{pl} и, следовательно, потери мощности в магнитопроводе;
- использованием в магнитопроводе ферромагнетика с малыми потерями мощности на частотах $f = 100\text{--}400$ кГц.

Повышение плазменной светоотдачи η_{pl} было достигнуто: [2]:

- выбором буферного газа (криптона) и его давления оптимального для генерации и выхода УФ излучения на 254 нм;
- выбором оптимальных размеров разрядной трубки;
- использованием трех-компонентного люминофора с эффективным преобразованием УФ излучение в видимое.

Все лампы марки Endura используют разрядную трубку одного и того же диаметра 50 мм, одинаковую высоту 140 мм, но различную длину: 200 мм ($P = 82$ Вт), 250 мм ($P = 107$ Вт) и 350 мм ($P = 157$ Вт) . Срок службы ламп (уменьшение светового потока на 30%) заявлен как 100,000 час; общий индекс цветопередачи $R_a = 80$. Изготавливаются лампы модели Endura с двумя цветовыми температурами – 3000 К и 4000 К. Лампы зажигаются в темноте менее чем через 10 сек после включения и практически мгновенно при дневном свете. 90% от установившегося светового потока лампы, работающей при дневном свете и при комнатной температуре 20°C, достигается через 10 сек. Время перезажигания лампы в установившемся режиме - 50 мсек [2].

Несмотря на хорошие технические и эксплуатационные характеристики, лампы трансформаторного типа имеют ряд существенных недостатков. Среди них:

- Сложная конструкция разрядной колбы (замкнутая разрядная трубка), требующая дорогого производственного оборудования и сложного дорогостоящего процесса изготовления колбы. В результате, повышается себестоимость лампы и ее продажная цена, что понижает конкурентоспособность источника света Endura..

- Специальный внешний поджигающий электрод с отдельной схемой питания и управления, что снижает надежность работы лампы и повышает ее цену.

- Два ферромагнитных кольцевых магнитопровода, каждый состоящий из двух плотно прижатых друг к другу полуколец с полированной поверхностью, снижают надежность работы лампы и стабильность ее параметров. Действительно, изменение температуры окружающей среды ведет к изменению температуры магнитопровода, что, в свою очередь, вызывает расширение (или сужение) толщины зазора между соприкасаемыми поверхностями полуколец. Это приводит к изменению величины магнитной индукции в магнитопроводе и, следовательно, к изменению электрических, энергетических и светотехнических параметров лампы.

Сегодня разрядные лампы являются наиболее распространенными источниками света, так как они относительно недорогие, имеют высокую световую отдачу, срок службы, значительно превышающий у ламп накаливания. Они подразделяются на лампы низкого и высокого давления. Среди ламп низкого давления наиболее ходовыми являются люминесцентные лампы. Они представляют собой источники света, в которых УФ излучение ртутного разряда с помощью люминофорного покрытия преобразуется в видимое. Обычно в газоразрядных лампах с электродами используют дуговой и тлеющий разряд. Для возникновения разряда в таких типах ламп необходимы электроды, которые обеспечивают поступление электронов в разрядный промежуток. Для того чтобы производить необходимое количество электронов электроды покрывают эмиссионным веществом (оксид щелочноземельных металлов), которое уменьшает работу выхода электронов из катода. Но в течение работы лампы количество эмиссионного вещества постепенно уменьшается, что неизбежно ведет к выходу лампы из строя. В таких лампах электроды являются основным фактором, определяющим ее срок службы (от 5000 до 20000 часов).

Главным преимуществом люминесцентных индукционных ламп является отсутствие электродов, в них энергия передается из источника в плазму посредством электромагнитного поля. По виткам катушки, расположенной вне колбы и соединенной с высокочастотным генератором, протекает ток высокой частоты, который создает переменное магнитное поле, которое в свою очередь порождает в объеме колбы переменное электрическое поле. Это поле зажигает индукционный разряд в колбе и поддерживает разряд.

Источники света трансформаторного типа имеют высокий к.п.д. ВЧ индуктора ($\eta_c > 0.95$) и высокую световую отдачу $\eta_v > 90$ лм/Вт. Разрядными камерами в них служат замкнутые цилиндрические трубки диаметром 5-6 см, охваченные замкнутыми магнитопроводами, изготовленными из MnZn ферромагнетика и симметрично размещенными на разрядной трубке. Две последовательно соединенные индуктивные катушки плотно охватывают

«свои» магнитопроводы и подводят ВЧ мощность от источника питания к лампе.[2]

Есть небольшое число публикаций, где приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований параметров плазмы ламп трансформаторного типа в смесях паров ртути и буферного газа: радиальное распределение концентрации электронов и возбужденных атомов ртути, зависимость электронной температуры и напряженности электрического (индукционного) ВЧ поля от давления буферного газа и мощности плазмы, колебания электронной температуры с частотой ВЧ поля на малых частотах 50-100 кГц, радиальный катафорез на больших разрядных токах. В то же время, практически нет работ по исследованию влияния размеров лампы (диаметра трубки, ее длины и высоты), формы, структуры и размеров магнитопровода, давления буферного газа, частоты ВЧ поля) на электрические, энергетические и светотехнические характеристики лампы. Нет публикаций по исследованиям ламп трансформаторного типа, изготовленных из разрядных трубок с эллиптическим сечением, с асимметричным размещением магнитопроводов. И, наконец, нам неизвестны аналитические выражения, связывающие параметры ВЧ индукционного разряда (разрядный ток, напряжение на плазме, напряженность ВЧ электрического поля, сопротивление и добротность плазмы) с условиями разряда (частота ВЧ поля, мощность плазмы), с конструктивными параметрами лампы (размеры трубки, давление инертного газа) и параметрами ВЧ индуктора.

В настоящей диссертации рассматривается индукционная лампа трансформаторного типа с симметричным расположением магнитопроводов.

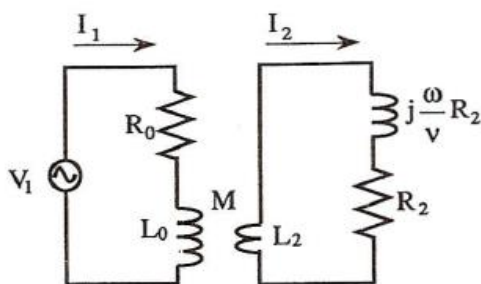
Потери мощности в магнитопроводе зависят от многих факторов: мощность лампы, сечение магнитопроводов, материал магнитопровода, частота питающего напряжения (частота ВЧ поля), геометрические размеры лампы, давление паров ртути, сорт и давление буферного газа и т.д. Для получения аналитических выражений, связывающий параметры плазмы индукционного разряда и мощности потерь в ВЧ индукторе с конструктивными параметрами

лампы и условиями ее питания ранее была создана трансформаторная модель индукционного разряда.

2.3. Трансформаторная модель индукционного разряда.

Трансформаторный подход к описанию индукционного ВЧ-разряда был впервые предложен в 20-х годах прошлого века английским физиком лордом Дж. Томсоном. Этот метод применяется для ламп с полостью и расположенными в ней ВЧ индуктором и к лампам трансформаторного типа, возбуждаемым в замкнутой трубке с помощью магнитопровода. [2]. Катушка индуктивности с ферромагнитным усилением (сердечник или магнитопровод) является в этом трансформаторе первичной обмоткой, а вторичной – в свою очередь, является одновитковая плазма индукционного разряда. Этот метод очень удобен для расчетов, поскольку он позволяет получить все необходимые выражения, которые связывают параметры лампы и катушки индуктивности с параметрами плазмы индукционного разряда низкого давления, работающего в килогерцовом диапазоне частот.

Рассмотрим электрическую схему индукционного разряда (Рис. 3-1), в которую входит первичная цепь – катушка индуктивности и ферромагнитный сердечник (магнитопровод) и вторичная цепь, которой является индукционный разряд. Между этими цепями связь может быть воздушной, если нет магнитного усиления, либо, если трансформатор не замкнутый (сплошной сердечник) или замкнутый (кольцевой) ферромагнитный магнитопровод, то трансформаторной.



Первичная цепь вторичная цепь

Рис. 2-9. Электрическая схема индукционного разряда [2]

От генератора ВЧ-мощности (электронного пускорегулирующего аппарата) подается синусоидальное ВЧ-напряжение U_c на катушку индуктивности. В отсутствие нагрузки импеданс первичной цепи Z_{10} , имеет комплексный характер и состоит из двух составляющих: а) активного сопротивления $R_o = R_c$, включающего в себя сопротивление катушки и эквивалентное сопротивление ферромагнитного сердечника (магнитопровода) R_{fer}

$$R_c = R_{coil} + R_{fer} , \quad (2-1)$$

б) индуктивного сопротивления $\omega L_o = \omega L_c$, определяемого частотой ВЧ поля $f = \omega/2\pi$, индуктивностью катушки L_{coil} и эффективной магнитной восприимчивостью ферромагнитного сердечника μ_{eff} :

$$\omega L_c = \omega \mu_{eff} L_{coil} \quad (2-2)$$

Величина μ_{eff} зависит от типа ферромагнетика и степени «замкнутости» магнитной цепи. В воздушном трансформаторе $\mu_{eff} = 1$; в незамкнутых магнитных цепях (ферромагнитный сердечник) $\mu_{eff} < \mu$; в кольцевом магнитопроводе $\mu_{eff} = \mu$ – магнитной восприимчивости ферромагнетика в замкнутой магнитной цепи.

Выражение для импеданса Z_{10} имеет вид [2]:

$$Z_{10} = (V_1/I_1)_0 = (V_c/I_c)_0 = [R_c^2 + (\omega \mu_{eff} L_{coil})^2]^{1/2} \quad (2-3)$$

где $I_c = I_1$ – ВЧ ток первичной цепи, который в пренебрежении межвитковыми емкостными токами равен току индуктивной катушки I_c , а V_1 – ВЧ напряжение на индуктивной катушке, равное V_c в отсутствие нагрузки.

Добротность первичной цепи (индуктора) в отсутствии нагрузки Q_{10} рассчитывается как [2]:

$$Q_{10} = Q_c = \omega L_c / R_c = \omega \mu_{eff} L_{coil} / (R_{coil} + R_{fer}) \quad (2-4)$$

Как видно, чем выше индуктивность катушки L_{coil} и эффективная магнитная восприимчивость ферромагнетика μ_{eff} и чем меньше сопротивление ВЧ индуктора R_c , тем выше добротность ВЧ индуктора. В существующих индукционных лампах с сердечником добротность индуктора достаточно высока и даже на низких частотах $f = 100 - 250$ кГц она достигает значений $Q_c = 400-500$.

Нетрудно получить удобную для анализа и расчетов формулу для импеданса первичной цепи без плазменной нагрузки Z_{10} [2]:

$$Z_{10} = R_c (1 + Q_c^2)^{1/2} \quad (2-5)$$

Отсюда следует, что при больших добротностях индуктора $Q_c \gg 1$, импеданс первичной обмотки $Z_{10} \approx \omega L_c$, т.е. является чисто индуктивным.

2.3.1 Электрическая схема индукционной плазмы

Электрическая схема индукционного разряда включает в себя активное сопротивление $R_2 = R_{pl}$, связанное с джоулевыми потерями при прохождении в плазме разрядного тока I_{pl} и совпадающее с ним по фазе, и два индуктивных сопротивления [2]:

1) ωL_{ind} – сопротивление геометрической индуктивности пламенной обмотки, определяемой ее размерами и распределением электрического поля;

2) $\omega_{eff} R_2 / \nu_e$ – сопротивление плазмы, связанное с инерцией электронов, где ν_e – частота столкновений электрона с атомами газа и ртути, ω_{eff} – эффективная круговая частота колебаний электронов в плазме ВЧ разряда. В общем случае $\omega_{eff} \neq \omega$ и ω_{eff} может в несколько раз превышать ω . Как показано ниже, в индукционных лампах, работающих на частотах $f < 2$ МГц, $\omega_{eff} \approx \omega$.

На относительно низких ВЧ частотах и не очень низких давлениях рабочей смеси, где выполняется условие $\omega \ll \nu_e$, индуктивное сопротивление, связанное с инерцией электронов плазмы $\omega_{eff} R_{pl} / \nu_e \ll \omega L_{ind}, R_{pl}$. В этих случаях, при расчетах параметров индукционной плазмы в лампах, работающих на частотах $f < 400$ кГц, индуктивным сопротивлением плазмы $\omega_{eff} R_{pl} / \nu_e$ можно пренебречь [2].

Электромагнитная связь между ВЧ индуктором и плазмой индукционного разряда осуществляется «через» взаимную индуктивность ВЧ индуктора и плазменного витка M , определяемую коэффициентом связи индуктора с плазменным витком k и индуктивностями L_c и L_{ind} :

$$M = k(L_c L_{ind})^{1/2} \quad (2-6)$$

В электрической схеме индукционного разряда V_2 - индуцированное в разрядной колбе и поддерживающее индукционный разряд ВЧ напряжение, $I_2 = I_{pl}$ - ток индукционного разряда, протекающий по плазменному витку. Тогда комплексный импеданс вторичной цепи (плазменного витка) Z_2 есть геометрическая сумма активного и индуктивных сопротивлений [2]:

$$\dot{Z}_2 = V_2/I_{pl} = R_{pl} + j(\omega L_{ind} + \omega_{eff} R_{pl}/v_e) \quad (2-7)$$

Модуль импеданса плазменного витка рассчитывается как:

$$Z_2 = [R_{pl}^2 + (\omega L_{ind} + \omega_{eff} R_{pl}/v_e)^2]^{1/2} \quad (2-8)$$

Добротность плазменного витка Q_2 определяется как :

$$Q_2 = (\omega L_{ind} + \omega_{eff} R_{pl}/v_e)/R_{pl} \quad (2-9)$$

Тогда Z_2 можно выразить через Q_2 как [2]:

$$Z_2 = R_{pl} [1 + Q_2^2]^{1/2} \quad (2-10)$$

2.3.2. Эквивалентная схема индукционного разряда

Эквивалентная схема индукционного разряда для случая $\omega_{eff} \approx \omega$ приведена на Рис. 3-2 [2]. Откуда видно, что одно активное и два индуктивных сопротивления плазменного витка R_{pl} , ωL_{ind} и $\omega R_{pl}/v_e$ внесены в первичную обмотку путем умножения их на безразмерный коэффициент K^2 , где K :

$$K = \omega M/Z_2 \quad (2-11)$$

Как видно, коэффициент K есть отношение импеданса взаимной индуктивности ωM к импедансу плазменного витка Z_2 . Таким образом, возникновение индукционного разряда изменяет импеданс первичной обмотки Z_1 тем, что вносит в нее члены, зависящие от параметров плазмы R_{pl} , L_{ind} и $L_e = R_{pl}/v_{eff}$ и взаимной индуктивности:

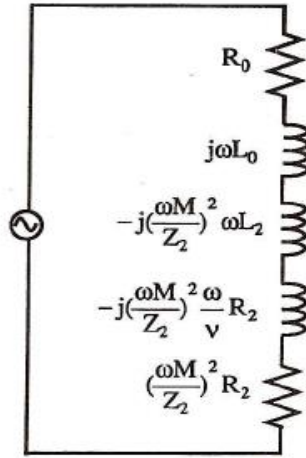


Рис. 2-10. Эквивалентная схема индукционного разряда [2]

$$R_{pl}^{tr} = K^2 R_{pl} = (\omega M / Z_2)^2 R_{pl} \quad (2-12)$$

$$L_{ind}^{tr} = K^2 L_{ind} = (\omega M / Z_2)^2 L_{ind} \quad (2-13)$$

$$(R_{pl}/v_e)^{tr} = K^2 L_e = (\omega M / Z_2)^2 R_{pl}/v_e \quad (2-14)$$

Откуда можно заметить, внесенные в первичную цепь активное сопротивление R_{pl}^{tr} и индуктивности L_{ind}^{tr} и $(R_{pl}/v_e)^{tr}$ определяются также импедансом вторичной цепи Z_2 , включающим, как активное так и индуктивные сопротивления. Важно отметить, что внесенное в первичную цепь активное сопротивление R_{pl}^{tr} увеличивает сопротивление первичной цепи R_1 :

$$R_1 = R_c + R_{pl}^{tr} \quad (2-15)$$

А «внесенные» в первичную цепь индуктивные сопротивления ωL_{ind}^{tr} и $\omega(R_{pl}/v_e)^{tr}$ уменьшают индуктивное сопротивление первичной цепи ωL_1 :

$$\omega L_1 = \omega L_c - \omega L_{ind}^{tr} - \omega(R_{pl}/v_e)^{tr} \quad (2-16)$$

Как видно из эквивалентной схемы индукционного разряда и приведенных выше формул для электрических элементов этой схемы, трансформаторная модель позволяет получить соотношения, связывающие электрические и энергетические параметры первичной цепи (индуктора) с параметрами вторичной цепи (плазмы).

Генерация вихревого переменного электрического поля в плазме подчиняется закону электромагнитной индукции:

$$V_2 = \int_{\ell} E dl = - d\Phi_{\ell}/dt = - \omega \int_{S_{pl}} B ds \quad (2-17)$$

Здесь E – напряженность индуцированного в плазме ВЧ электрического поля, направленного вдоль замкнутого контура длиной ℓ , Индуцированное в плазме на контуре ℓ ВЧ напряжение. $\omega = 2\pi f$ – круговая частота поля, Φ_{ℓ} – магнитный поток, проходящий через сечение плазмы S_{pl} , охватываемое контуром ℓ . $B = \mu_{pl}\mu_0 H$ – магнитная индукция в плазме. H – напряженность магнитного поля, создаваемого ВЧ током катушки индуктивности I_c , μ_{pl} – магнитная проницаемость плазмы: в низкотемпературных плазмах с концентрацией электронов $n_e > 10^{11}$, $\mu_{pl} = 1$.

В общем случае, часть замкнутого магнитного потока Φ_L , генерируемого током катушки I_c и усиленного ферромагнетиком, проходит мимо плазмы, охватываемой контуром ℓ . В этом случае говорят об утечке магнитного потока» $\Delta\Phi = \Phi_L - \Phi_{\ell}$. В лампах трансформаторного типа, где в качестве трансформатора используется кольцевой магнитопровод, охватывающий замкнутую разрядную трубку, коэффициент связи k близок к единице. Так как создаваемая током катушки I_c магнитная индукция $B_{fer} = \mu_{fer}\mu_0 H$, полностью замыкается в магнитопроводе, то утечки магнитного потока нет, и весь магнитный поток Φ_L проходит «сквозь» сечение магнитопровода S_{fer} , охватываемого замкнутым плазменным витком длиной ℓ . Здесь μ_{fer} – магнитная проницаемость материала сердечника.

Как следует из уравнения (2-17), вихревое ВЧ напряжение V_2 , индуцированное магнитным потоком Φ в разрядной колбе на замкнутом контуре длиной ℓ , определяется частотой ВЧ поля ω , сечением плазмы S_{pl} и магнитной индукцией в плазме B_{pl} .

$$V_2 = k\omega B_{fer} S_{fer} \quad (2-18)$$

Индуцированное в колбе/трубке ВЧ напряжение V_2 , поддерживающее в колбе самостоятельный индукционный разряд, практически не зависит от частоты ВЧ поля. Тогда, в соответствии с (2-18), снижение рабочей частоты ВЧ поля ω должно сопровождаться либо повышением магнитной индукции B_{fer} , либо увеличением сечения ферромагнитного сердечника S_{fer} . Увеличивать

магнитную индукцию в сердечнике (и в плазме) можно либо повышением тока в индуктивной катушке I_c , либо увеличением эффективной магнитной проницаемости μ_{eff} . Последняя достигается выбором ферромагнетика с большим значением μ_{fer} , уменьшением «магнитного сопротивления» магнитной цепи ВЧ индуктора.

Важность соотношения (2-18) для разработчика индукционных ламп состоит в том, что на частотах $\omega \ll \nu$ его левая часть – ВЧ напряжение на индукционной плазме V_2 - есть чисто плазменная характеристика лампы. Параметры индукционного разряда низкого давления, определяющие величину V_2 - напряженность ВЧ электрического поля E_{pl} и длина плазменного витка/шнура ℓ_{pl} - не зависят от частоты ВЧ поля, от магнитной индукции и от сечения сердечника/магнитопровода. Они зависят от геометрии разрядного промежутка, расположения ВЧ индуктора относительно колбы, от сорта и давления рабочей смеси и от плотности плазмы.

На основе трансформаторной модели индукционного разряда, электродинамических моделей ВЧ индукционного разряда низкого давления, уравнений мощности потерь в ВЧ индукторе и эмпирических соотношений для напряженности ВЧ электрического поля и световой отдачи плазмы в настоящей диссертации используются аналитические выражения, связывающие параметры плазмы индукционного разряда и мощность потерь в ВЧ индукторе с конструктивными параметрами лампы и условиями ее питания.

3. РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

3.1. Постановка задачи

Энергетическая эффективность безэлектродных источников света определяется КПД ВЧ индуктора. На частотах поля $f < 1\text{МГц}$ мощность рассеиваемого ВЧ индуктором электромагнитного излучения $P_{\text{изл}}$ значительно меньше поглощаемой плазмой ВЧ мощности P_{pl} и мощности потерь в ВЧ индукторе. Тогда для потребляемой индукционной лампой мощности P можно записать

$$P = P_{\text{fer}} + P_{\text{pl}}$$

Световая отдача индукционной люминесцентной лампы η_v может быть представлена как произведение КПД индуктора η

$$\eta = 1 - P_{\text{fer}}/P$$

на световую отдачу плазмы $\eta_{\text{pl}} = \Phi/P_{\text{pl}}$

$$\eta_v = \eta \eta_{\text{pl}}$$

где Φ – световой поток плазмы индукционной люминесцентной лампы.

Из этого следует, что КПД индуктора η увеличивается с уменьшением мощности потерь в ВЧ индукторе P_{fer} , а световая отдача лампы η_v возрастает с увеличением η . Таким образом, для достижения максимальных световых отдач η_v следует добиваться минимальных значений P_{fer} .

3.2. Соотношения, связывающие мощность потерь в ВЧ индукторе и КПД ВЧ индуктора с конструктивными параметрами разрядной колбы и внешними условиями.

В настоящей работе проводится расчет и выбор геометрических параметров ферритовых сердечников для ламп различных мощностей и частот с целью добиться наименьших потерь мощности на сердечниках и повысить КПД ВЧ индуктора при различных условиях.

Индукционная лампа трансформаторного типа с симметрично расположенными сердечниками (Рис. 3-1) имеет тороидальную форму и представляет собой стеклянную цилиндрическую замкнутую трубку. С двух сторон на лампе расположены два ферромагнитных магнитопровода кольцевой формы, охватывающие трубку. На каждом магнитопроводе размещена катушка (первичная обмотка), на которую подается переменное напряжение. Внутренняя поверхность колбы покрыта люминофором. В качестве наполнения колбы используется ртуть и инертный газ.

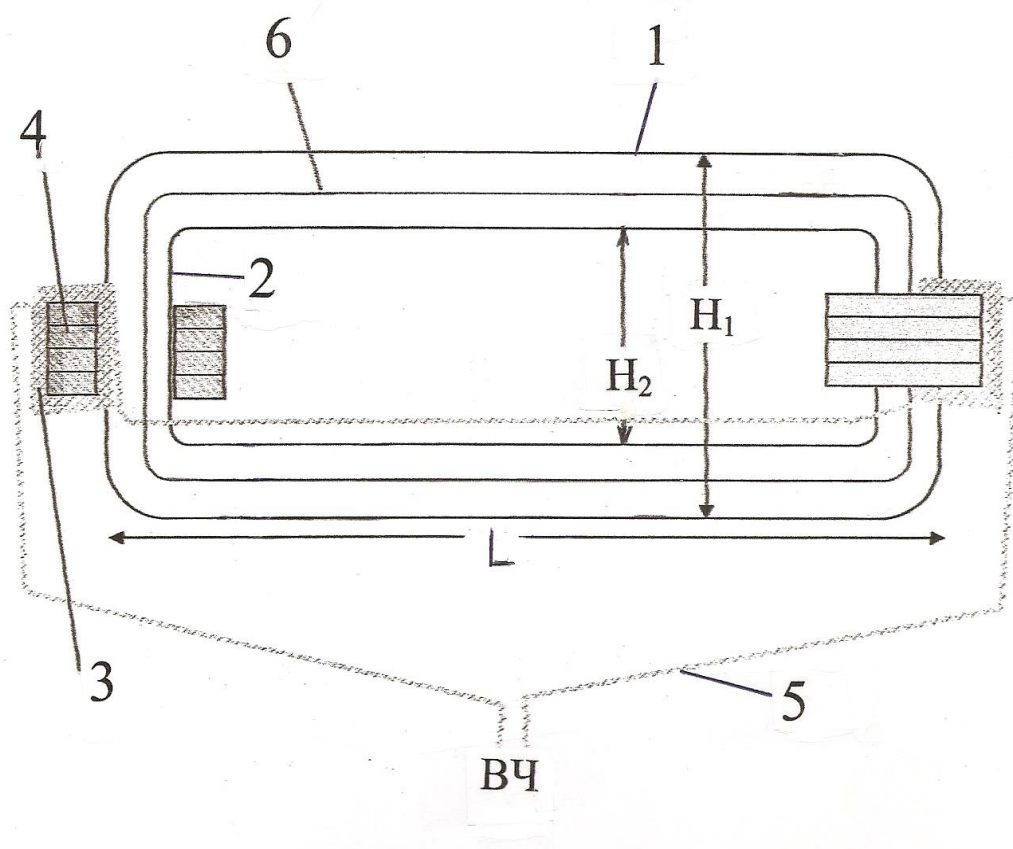


Рис. 3-1. Эскиз лампы трансформаторного типа. 1 – разрядная трубка; 2 – соединительная трубка; 3 – индуктивная катушка; 4- магнитопровод; 5 – соединительные трубки; 6 – ось разрядной трубки/плазменный виток.

Принцип работы безэлектродной лампы основан на законе электромагнитной индукции. По виткам индуктивной катушки, расположенной около колбы и соединенной с высокочастотным генератором, протекает ток

высокой частоты. Данный ток создает переменное магнитное поле, которое в свою очередь создает в колбе электрическое поле. Поле передает энергию электронам, что необходимо для зажигания в колбе разряда и его поддержания.

Из закона электромагнитной индукции:

$$\int_L E dl = U_L = -\partial\Phi / \partial t = -\omega B_m S \cos(\omega t) \quad (3-1)$$

где E - напряженность индуцированного электрического поля, B/m

L - длина замкнутого контура, m

Φ - магнитный поток, проходящий через сечение S , Bb

U_L - напряжение на контуре длиной L , B

$\omega = 2\pi f$ - круговая частота поля, rad/c

B_m - амплитуда магнитной индукции в сердечнике, Tl

S - сечение сердечника, m^2

Напряженность ВЧ электрического поля в плазме ламп трансформаторного типа низкого давления, возбужденных на частоте ВЧ поля 100-400 кГц и удельных мощностях 0,5-5,0 Вт/см, весьма близка к напряженностям электрического поля в плазме положительного столба разрядов постоянного тока, имеющего такие же размеры, смесь и давление рабочей смеси и удельную мощность. [9]

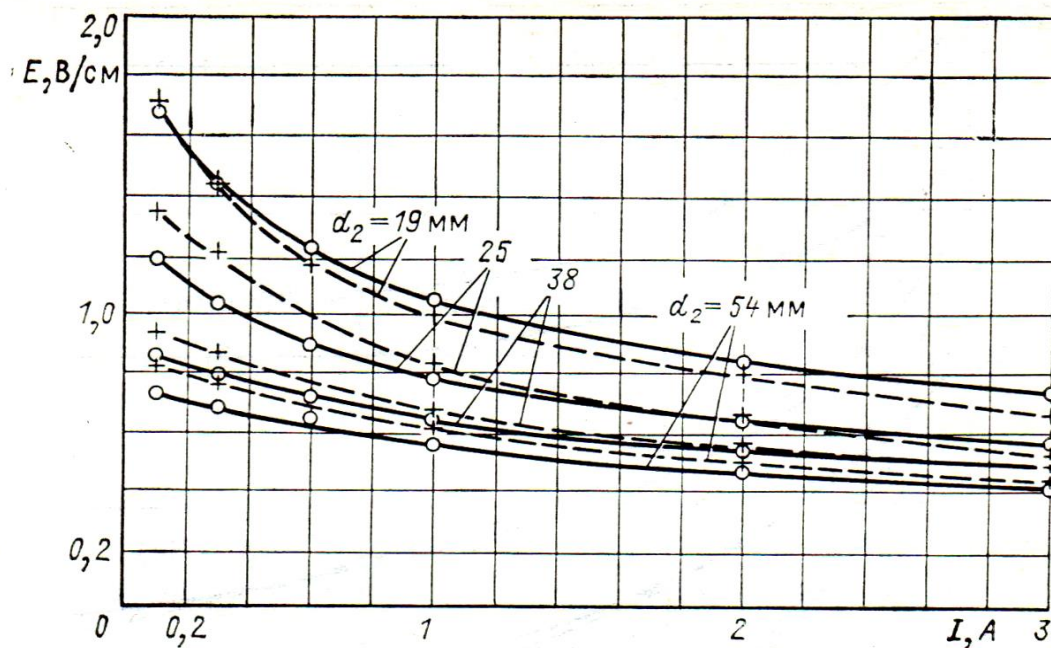


Рис. 3-2. Зависимость градиента потенциала E от силы тока в трубках разного диаметра [7]

Для расчета и анализа электрических характеристик индуктивного разряда предлагается использовать трансформаторную модель, где катушка является первичной обмоткой трансформатора, а плазма является вторичной обмоткой, количество витков которой равно единице, то есть индукционный разряд представляет собой замкнутый тороидальный плазменный виток, индуктивно связанный с первичной обмоткой. Выражение для магнитной индукции связывает геометрические размерами сердечника и длину витка при известных E , V и ω . Следовательно, при постоянных значениях E и L уменьшение сечения сердечника достигается увеличением произведения $\omega \cdot B_m$. Однако, рост ω и V ведет к увеличению удельных потерь мощности в сердечнике. Также нужно отметить, что одним из наиболее эффективных способов повышения светоотдачи является увеличение мощности, вкладываемой в плазму. Это достигается путем уменьшения потерь мощности в ферромагнитном сердечнике (магнитопроводе).

Если рассмотреть сечение магнитопровода, через которое проходит магнитный поток, то это прямоугольник сечением $S = H \times a$, $см^2$ (Рис. 3-3)

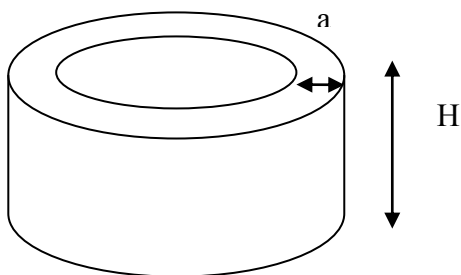


Рис.3-3. Ферромагнитный магнитопровод.

$$V_{fer} = H \cdot \pi \cdot (R_{fer}^2 - R_{tr}^2) \quad (3-2), \text{ где}$$

$$R_{fer} = R_{tr} + a \text{ (будем считать } a=2\text{см)}$$

Полные потери в ВЧ индукторе

$$P = P_{fer} + P_{coil}$$

P_{coil} очень малы по сравнению с потерями в сердечнике за счет малых токов [10], поэтому ими можно пренебечь.

Потери в ферритовых материалах описываются следующей эмпирической формулой:

$$P = a \cdot f^c \cdot B^b \cdot V_{fer} \quad (3-3)$$

,где V_{fer} - объем ферритового сердечника, $см^3$

a, c, d - коэффициенты, характеризующие свойства ферромагнетиков, зависят от типа ферромагнетика и частоты поля f

f - частота поля, $кГц$

B - магнитная индукция, $кГ$

Выражение, связывающее удельную мощность потерь в магнитопроводе ρ_{fer} с параметрами плазмы индукционного разряда и параметрами ВЧ индуктора [11]:

$$\rho_{fer} = \alpha(22,5)^b \Gamma^{c-b} (E_{pl} I_{pl})^b (1+Q_2^2)^{0,5b} / k^{0,5b} S_{fer}^b \quad (3-4),$$

где α – эмпирический коэффициент,

a и d – показатели степени, зависящие от типа ферромагнетика

l_{pl} – длина плазмы

E_{pl} – напряженность индукционного ВЧ электрического поля, возбужденного ВЧ индуктором и поддерживающего плазму ВЧ разряда

В заданном диапазоне мощностей плазмы, частот ВЧ и размеров разрядной трубки добротность $Q_2 < 0,3$ [9] и коэффициент связи плазменного витка с ВЧ индуктором $k = 1$. Тогда выражение (3-4) можно представить в виде:

$$\rho_{fer} = \alpha(22,5)^b \Gamma^{c-b} (E_{pl} l_{pl})^b / S_{fer}^b \quad (3-5)$$

Получим выражение для мощности потерь в магнитопроводе $P_{fer} = \rho_{fer} V_{fer}$:

$$P_{fer} = (22,5)^b \alpha \Gamma^{c-b} (E_{pl} l_{pl})^b (D+a) / (H_{fer} a)^{b-1} \quad (3-6)$$

позволяет рассчитать оптимальные размеры колбы/трубки и сердечника для достижения минимальных потерь мощности в сердечнике.

3.2.1. Выбор материала ферромагнетика.

Ферромагнетики – вещества, как правило, в твердом кристаллическом или аморфном состоянии, в которых ниже определенной критической температуры, точки Кюри (температура фазового перехода 2 рода, связанного со скачкообразным изменением свойств симметрии вещества), устанавливается дальний ферромагнитный порядок магнитных моментов атомов, ионов или электронов.

Функцией ферромагнитного сердечника (магнитопровода) является увеличение создаваемого током катушки индуктивности магнитного потока Φ и его индукции B до значений, необходимых для индуцирования в разрядной камере вихревого ВЧ-напряжения и напряженности электрического поля, достаточных для зажигания и поддержания в разрядной камере индукционного разряда.

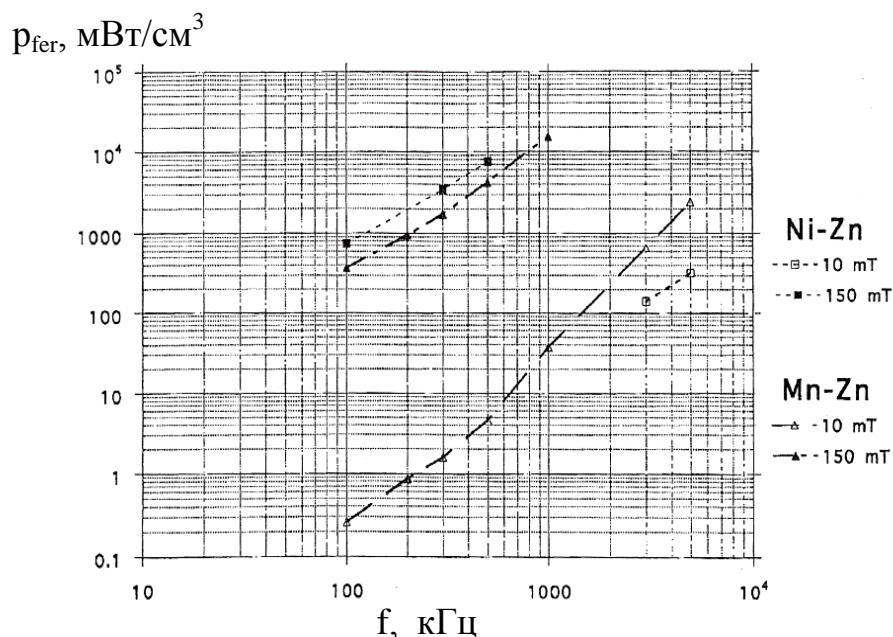


Рис. 3-4 Зависимость удельных потерь мощности p_{fer} в Ni-Zn и Mn-Zn ферромагнетиках от частоты ВЧ поля f .

На частотах 100–500 кГц, на которых для зажигания индукционного разряда требуется высокая магнитная индукция $B_{fer} \approx 1500$ Гаусс (1,5 мТл), удельные потери мощности в Mn-Zn ферритах более, чем в два ниже, чем в Ni-Zn ферритах.

Рассмотрим три типа материала: R Material, P Material, F Material. Для уменьшения потерь в сердечнике необходимо выбрать ферромагнетик с наименьшими объемными потерями. По приведенным ниже зависимостям объемных потерь от величины магнитного поля при различных значениях частоты (Рис. 3-5,3-6, 3-7, 3-8), наиболее оптимальным оказался ферромагнетик R Material.

На рисунке 3-5 построены зависимости p_{fer} Mn-Zn ферритов различных марок F, K, P и R, различающихся разным процентным содержанием марганца и цинка, от магнитной индукции B_{fer}

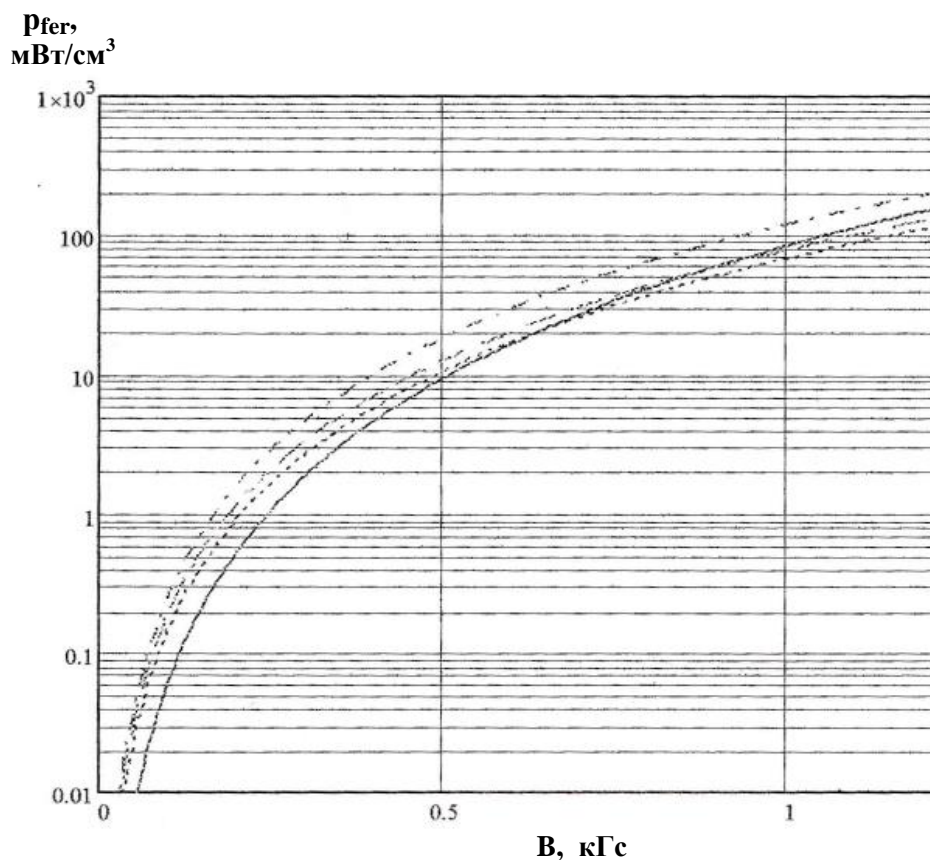


Рис. 3-5. Зависимости удельных потерь мощности от магнитной индукции в различных марках Mn-Zn ферритов. Частота ВЧ поля $f = 100$ кГц, $T_{fer} = 100^\circ\text{C}$. Типы ферритов: — К; ---- R; - · - P; · · · F.

Материал феррита типа К рассматривать не будем. У него минимальные потери, но и очень низкая точка Кюри, что приводит к нагреванию сердечника.

Зависимости построены по данным, измеренным на частоте 100 кГц и температуре сердечника $T_{fer} = 100^\circ\text{C}$. Видно, что хотя характер зависимости p_{fer} от B_{fer} в исследуемых ферромагнетиках примерно одинаков, абсолютные величины удельных потерь мощности, измеренных в различных марках Mn-Zn ферритов на одних и тех же частотах, разнятся от 1,5 до 2 раз. Например, на частоте 100 кГц при типичной для индукционных ламп магнитной индукции $B_{fer} = 800$ Гаусс удельные потери мощности растут от 40 mW/cm^3 (марка R) до 70 mW/cm^3 (марка F).

Для R Material:

Потери для $f = 100$ кГц и $B_m = 1000\text{G}$ при температуре $t = 100^\circ\text{C}$ составляют

$$P_{уд} \approx 70 \frac{мВт}{см^3}$$

Для R Material:

Потери для $f = 100$ кГц и $B_m = 1000G$ при температуре $t = 100$ °C составляют

$$P_{уд} \approx 100 \frac{мВт}{см^3}.$$

Для F Material:

Потери для $f = 100$ кГц и $B_m = 1000G$ при температуре $t = 100$ °C составляют

$$P_{уд} \approx 230 \frac{мВт}{см^3}.$$

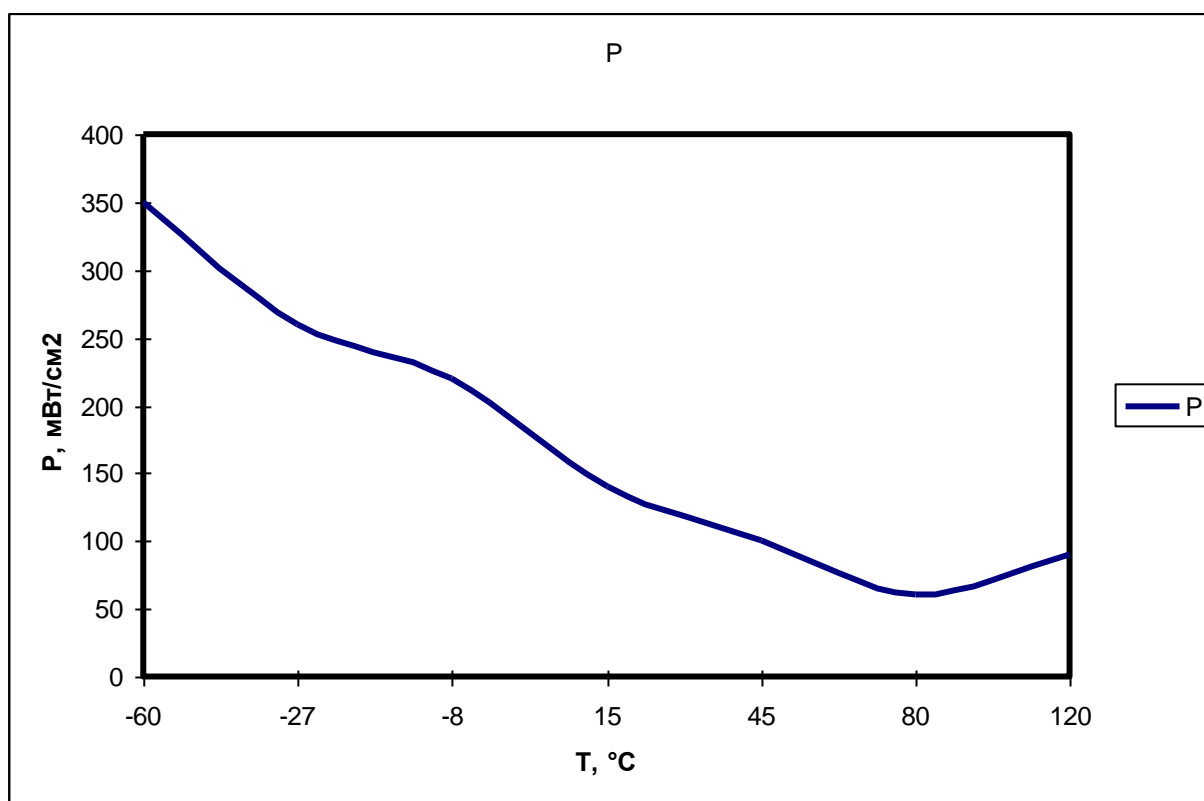


Рис.3-6. Зависимость удельных потерь ферромагнетика R-типа от температуры

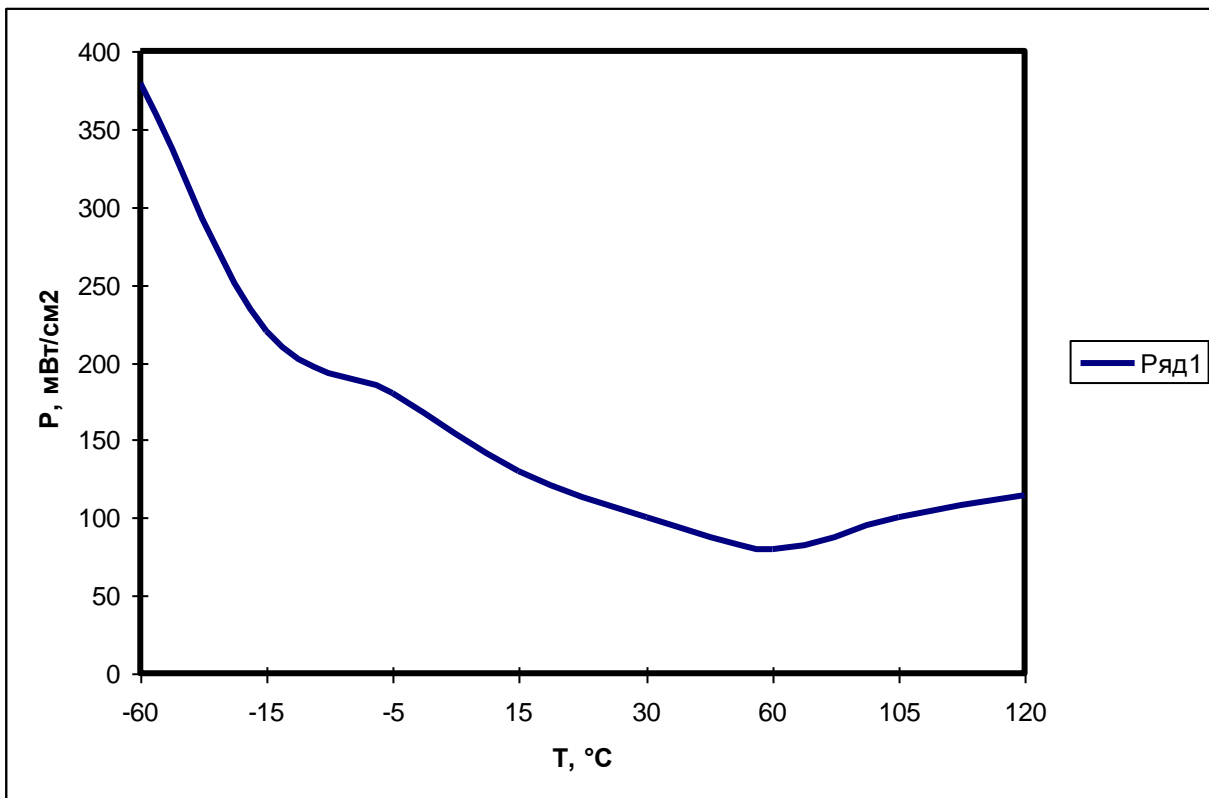


Рис. 3-7. Зависимость удельных потерь ферромагнетика Р-типа от температуры

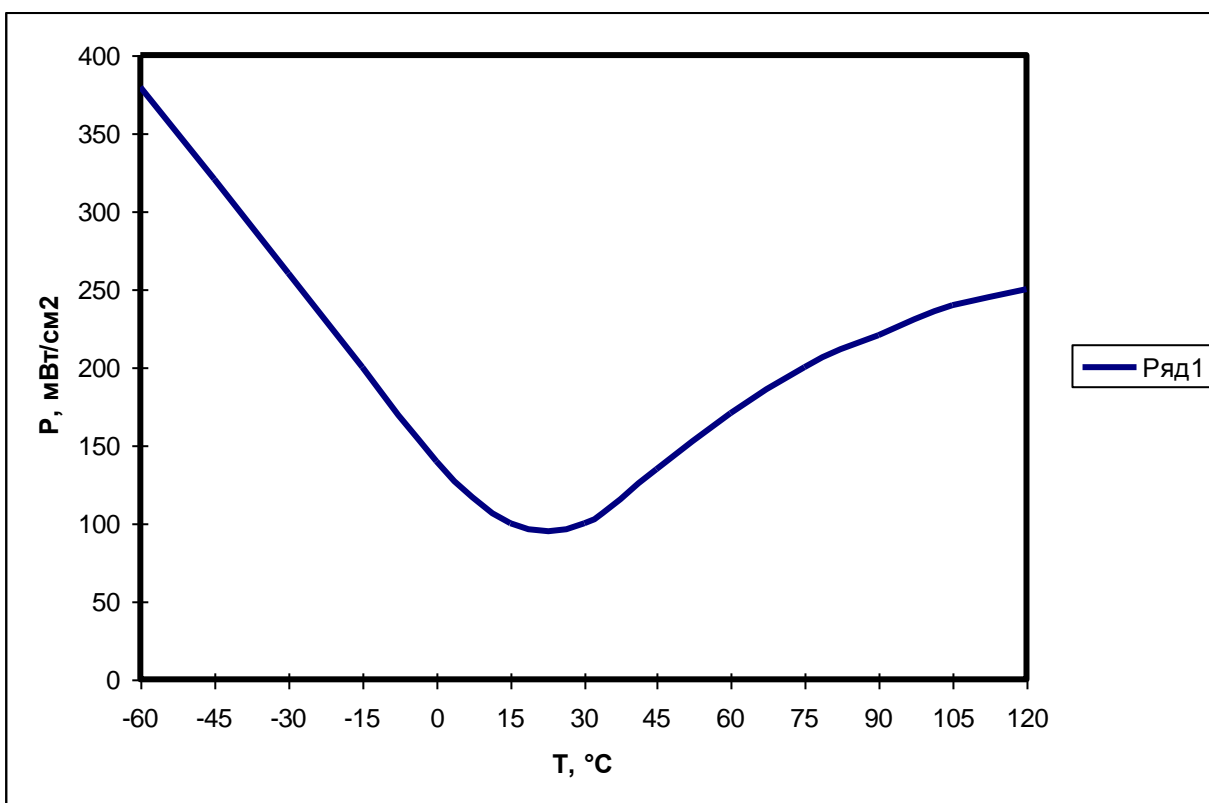


Рис.3-8. Зависимость удельных потерь ферромагнетика F-типа от температуры при магнитной индукции 100 G и частоте 100 кГц.

Таким образом в лампе будет рассматриваться ферромагнетик R-типа. Он имеет минимум потерь в районе рабочих температур магнитопровода $T = 60-120^{\circ}\text{C}$, к тому же потери мощности мало меняются в этом интервале температур

Таблица 1. Коэффициенты a,b,c для частоты 100кГц

Тип ферромагнетика	A	C	B
R	0.036	1.64	2.68
P	0.0434	1.63	2.62
K	0.053	1.6	3.15

Из анализа формулы потерь мощности в сердечнике следует, что при увеличении f и B объемные потери в феррите растут.

3.2.2 Выбор типа люминофора.

Люминофор - твердые или жидкие вещества, способные излучать свет под действием различного рода возбуждений. Для лампы, рассматриваемой в данной работе желательно применение узкополосного люминофора – люминофора с излучением, сосредоточенным в трех узких полосах спектра: синей (450 нм), зеленой (540 нм) и красной (610 нм). Главным достоинством этих люминофоров является значительно более высокая стабильность по отношению к облученности УФ-излучением 185 нм и к температуре при высоком квантовом выходе [6]. К недостаткам данного типа люминофоров относится высокая стоимость, но помимо высокой цены, УПЛ имеет ещё недостаток. За счёт малой инерционности УПЛ, использующие его лампы обладают большим коэффициентом пульсаций светового потока, который имеет значение более 80%. Пульсации потока приводят к зрительному утомлению, а в некоторых случаях (на производстве) могут привести к

стробоскопическому эффекту. Но при частотах 1000 Гц и выше глубина пульсаций так мала, что стробоскопический эффект отсутствует. К тому же при увеличении частоты увеличивается световая отдача и улучшаются условия перезажигания.

Толщина люминофорного слоя p определяется как масса люминофора Мл, остающаяся после сушки и обезгаживания, отнесенная к площади внутренней поверхности колбы, покрытой люминофорным слоем $p = \text{Мл}/\text{Сл}$. Чем толще слой люминофора, тем выше срок его службы. В то же время световая отдача лампы достигает максимума при массовой плотности люминофора $p = 3-5 \text{ мг}/\text{см}^2$, которой соответствует толщина люминофорного слоя $\delta = 9-15 \text{ мкм}$. Поэтому дальнейшее увеличение толщины слоя нецелесообразно.

3.2.3. Отражающие покрытия

Во многих безэлектродных индукционных люминесцентных лампах есть области трубки, вблизи которых расположены элементы лампы, блокирующие или поглощающие видимый свет, из-за чего также снижается световая отдача. Например, компоненты индуктора, такие как катушка индуктивности и сердечник, поглощают видимый свет, проходящий через стенки полости. Доля этого светового потока, который теряется за счет поглощения, достигает 10-15 % всей мощности лампы.

Действенный способ решения этой проблемы – нанесение на заблокированную поверхность разрядной камеры специального покрытия, отражающего видимый свет. Та часть светового потока, которая падает на эту поверхность, отразится от нее и возвратится на неблокированную поверхность колбы, тем самым увеличив световой поток лампы.

В качестве таких материалов, отражающих видимый свет используется диоксид алюминия Al_2O_3 , слой которого толщиной 50 – 80 мкм наносится на внутреннюю поверхность заблокированной части стенки разрядной камеры. Эксперименты, проведенные над безэлектродной индукционной

люминесцентной лампой марки Everlight-50 ($P=50$ Вт), показали, что нанесение отражающих покрытий на стенки полости повышает световую отдачу лампы на 10 -15 %. [1]

3.3. Расчет потерь мощности в магнитопроводе

При конструировании ламп основной задачей является минимизация потерь мощности и увеличение светоотдачи лампы.

Если нагрузка на внутренние стенки колбы будет слишком большой, то слой люминофора будет разрушаться быстрее и это приведет к изменению спектрального состава излучения лампы.

Расчет мощности потерь в ферромагнитном сердечнике будем проводить для различных мощностей лампы, частот, диаметров разрядной трубки, сечений ферритов и длин плазменных витков.

Диапазон мощности ламп примем $P = 100 \div 400$ Вт. Именно для данных мощностей ранее в предыдущих работах производились исследования на допустимых частотах $f = 100 \div 400$ кГц. Диаметр разрядных трубок также возьмем из ранее проводимых работ $D = 1.5 \div 8$ см, рассматривать диаметр более 8 см не будем, это не целесообразно для выбранного диапазона мощности ламп. Соответственно выберем диапазон длины плазменного витка, который напрямую зависит от длины лампы $l_{pl} = 40 \div 120$ см. Сечение феррита примем равным $S_{fer} = 4 \div 12$ см²

Проведем расчет мощности потерь в ВЧ индукторе, которая складывается из мощности потерь в ферромагнитном сердечнике и мощности потерь на катушке индуктивности. Потери на катушке очень малы и не вносят большой вклад в общую мощность потерь, ими можно пренебречь [10]

Используем выражение (3-6) для получения значений мощности потерь в ферромагнитном сердечнике при выбранных диапазонах данных.

В нашем случае используем ферромагнетик типа R, поэтому выбираем коэффициенты из Таблицы1 $\alpha=0,036$ $c=1.64$ $b=2.68$. Подставив эти данные, получим выражение

$$P_{fer} = 475(E_{pl}I_{pl})^{2,68}(D + a)/f(H_{fer}a)^{1,64} \quad (3-7),$$

где P_{fer} в [мВт], f в [кГц], E_{pl} в [В/см], I_{pl} , D , a и H_{fer} в [см]

Экспериментальные зависимости напряженности электрического поля E_{pl} в плазме положительного столба от диаметра разрядной трубки $D = 2-8$ см и разрядного тока $I_{pl} = 0,5-5$ А весьма слабо меняется с давлением инертного газа в интервале 0,2-2,0 мм рт.ст. и удовлетворительно аппроксимируется выражением:

$$E_{pl} = 1,27/I_{pl}^{0,2}D^{0,5} = 1,6I_{pl}^{0,25}/D^{0,62}P_{pl}^{0,25} \quad (3-8) \quad [9]$$

Получим выражение, связывающее мощность потерь в магнитопроводе с высотой и толщиной магнитопровода H_{fer} и a , диаметром разрядной трубки D , длиной плазменного витка l_{pl} , частотой ВЧ поля f и разрядным током I_{pl} :

$$P_{fer} = 1150I_{pl}^{2,88}(D + a)/fP_{pl}^{0,58}D^{1,44}(H_{fer}a)^{1,63} \quad (3-9)$$

Расчетные данные по (3-9) представлены в Таблице 2 (Приложение)

Чем меньше мощность потерь в ферритовом магнитопроводе, тем выше КПД и , следовательно, световая отдача.

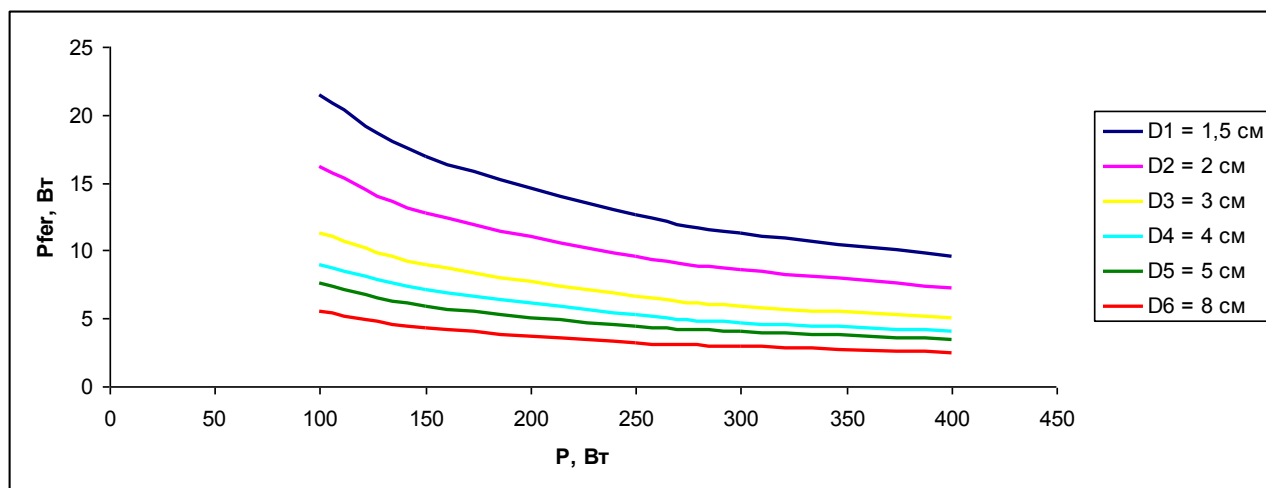
Оценим КПД ВЧ индуктора при различных параз,метрах мощности лампы, частоте, диаметре разрядной трубки, сечении магнитопровода и длине плазменного витка

$$\eta = \frac{P_n - (P_{pl} - P_c)}{P_n} = \frac{P_{pl}}{P_n}. \quad (3-10)$$

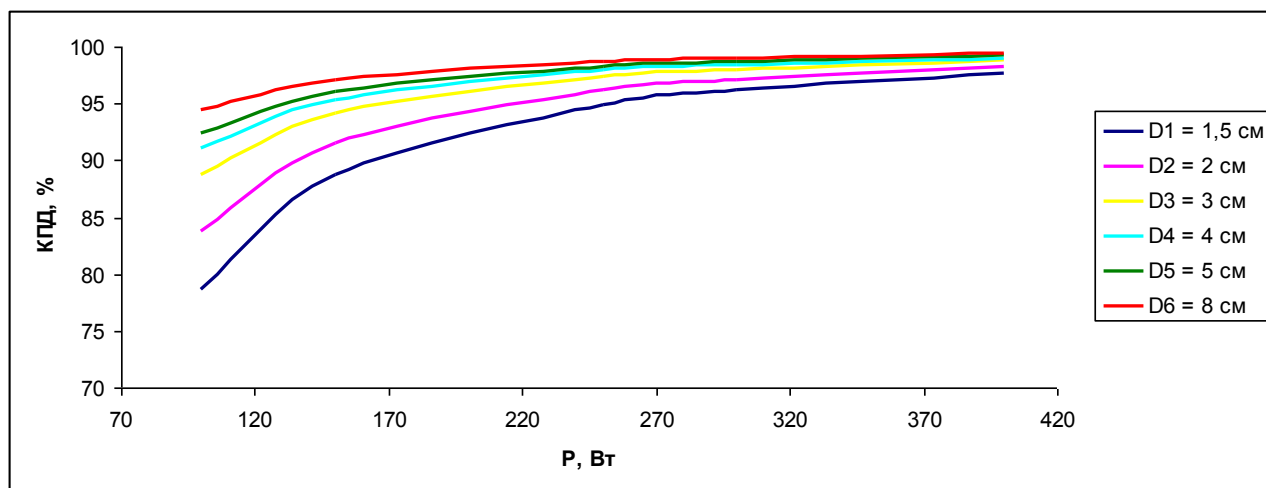
Значения КПД ВЧ индуктора представлены в Таблице 3 (Приложение)

3.4. Влияние мощности лампы на P_{fer} и КПД ВЧ индуктора.

Расчет потерь мощности производился при мощностях 100-400Вт на частотах 100-400кГц при диаметрах разрядных трубок 1,5-8 см, длинах плазменного витка 40-120 см и сечениях сердечника 4-12 см².



а)

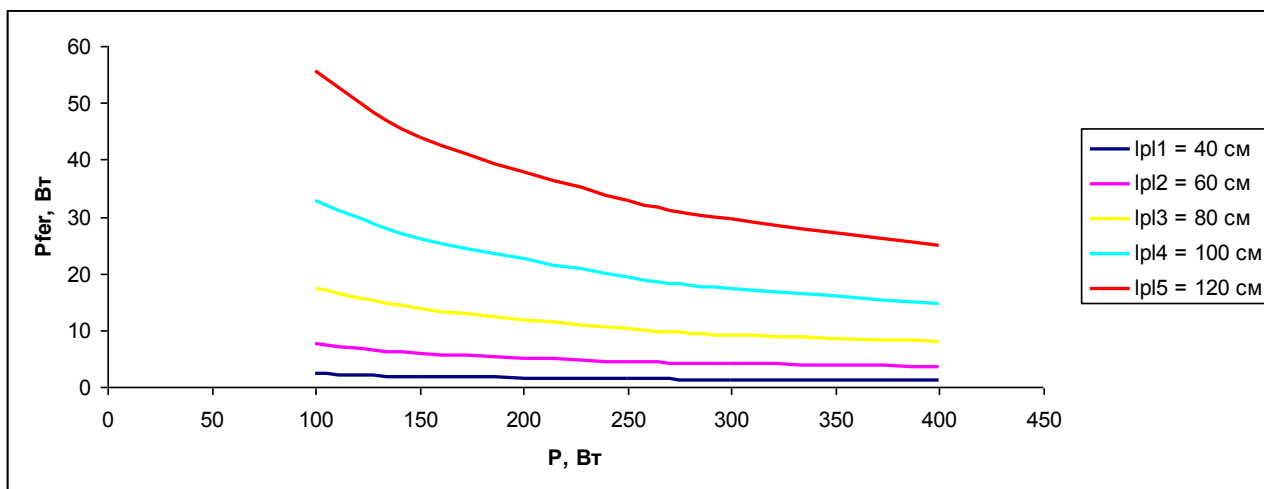


б)

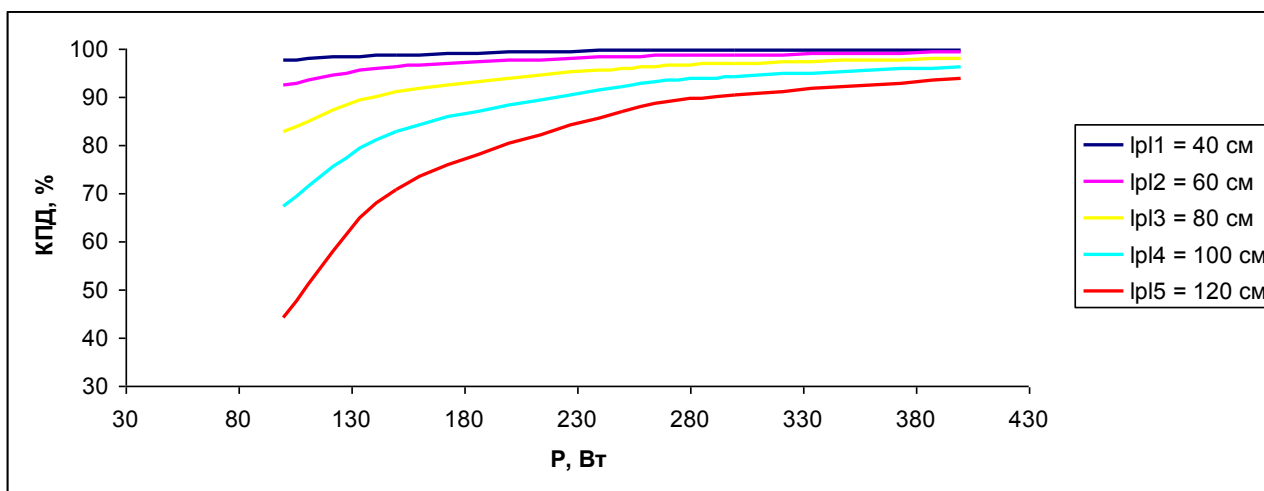
Рис. 3-9. Зависимость а) потерь в сердечнике и б) КПД ВЧ индуктора от мощности плазмы для различных диаметров трубки при $S = 4\text{см}^2$, $l_{pl} = 60\text{см}$, $f = 100\text{ кГц}$.

При увеличении мощности потери в сердечнике уменьшаются и соответственно увеличивается КПД ВЧ индуктора. При малых диаметрах

потери выше в 2 раза, чем при больших. Для достижения необходимого КПД ВЧ индуктора 95% необходимо использовать диаметры от 3 до 8 см.



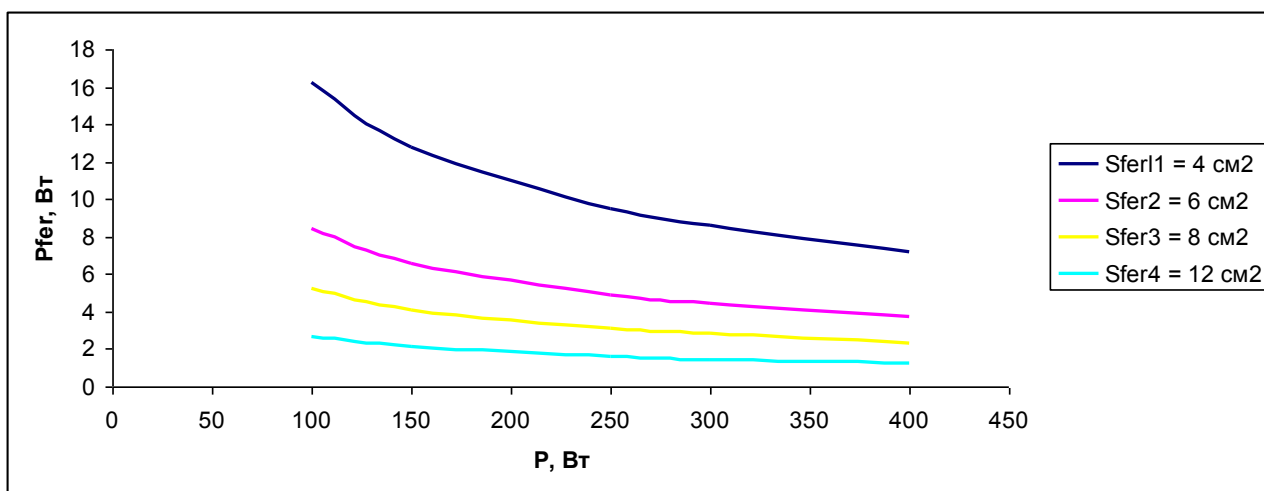
а)



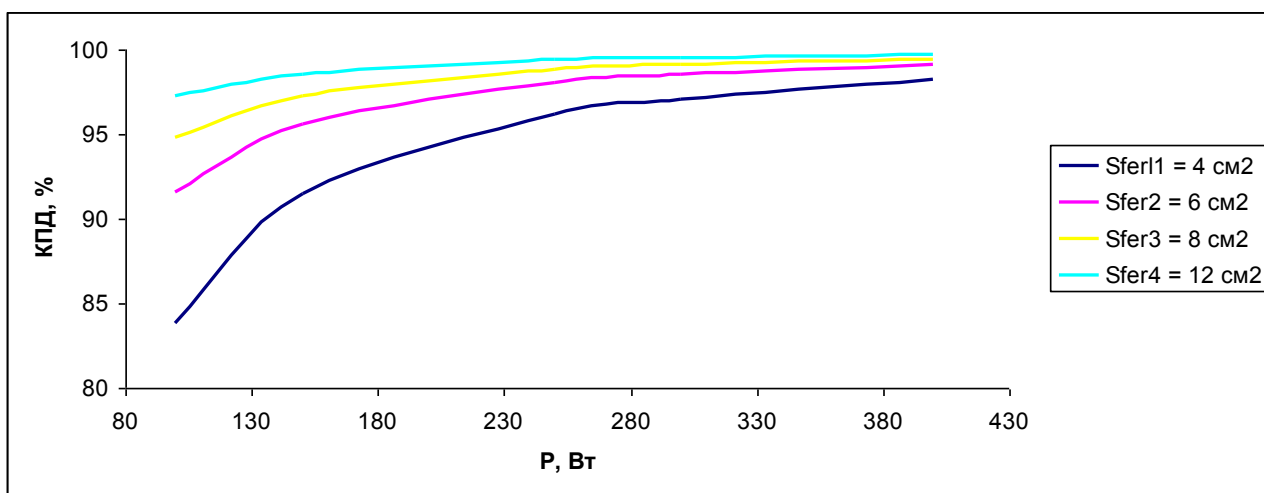
б)

Рис. 3-10. Зависимость а) потерь в сердечнике и б) КПД ВЧ индуктора от мощности плазмы для различных длин плазменного витка при $S = 4\text{см}^2$, $D = 5\text{см}$, $f = 100$ кГц.

На частоте 100 кГц потери мощности очень высоки при длинных трубках. Здесь уместно использовать трубки только до 60 см. При длинных трубках потери в сердечнике могут достигать более 50% на низких мощностях.



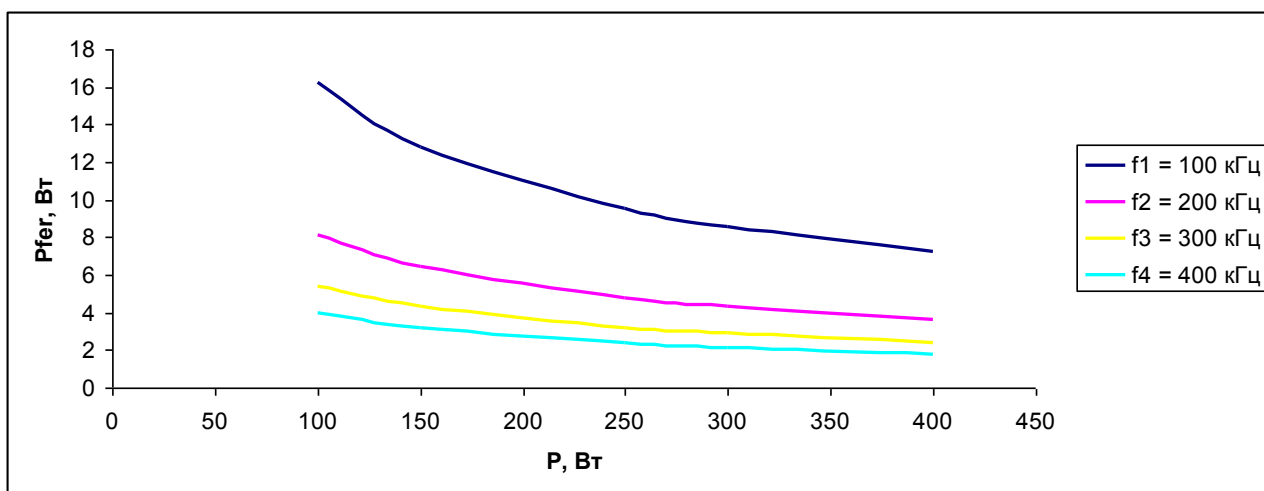
a)



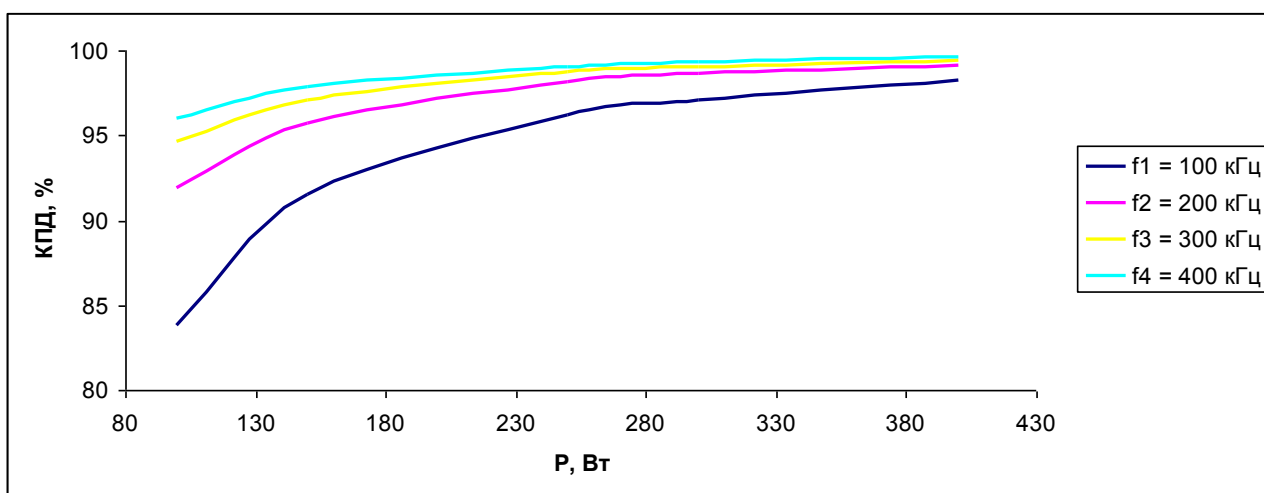
б)

Рис. 3-11. Зависимость а) потерь в сердечнике и б) КПД ВЧ индуктора от мощности плазмы для различных сечений феррита при $l_{pl} = 60\text{см}$, $D = 2\text{см}$, $f = 100\text{кГц}$.

Потери мощности в феррите возрастают с уменьшением его сечения. КПД ВЧ индуктора достигает 95% и выше при любых сечениях на высоких мощностях.



а)



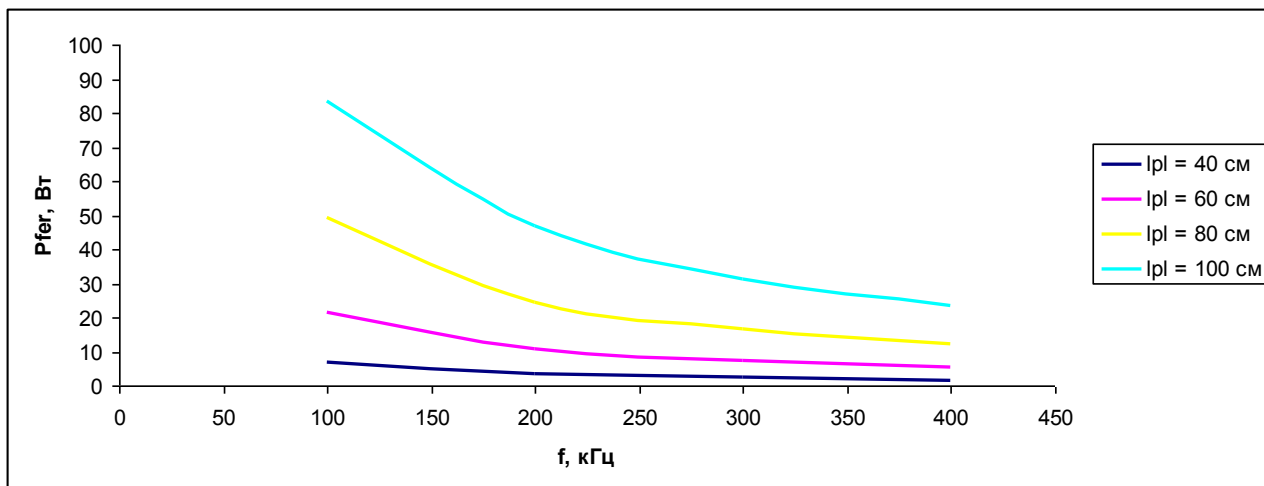
б)

Рис. 3-12. Зависимость а) потерь в сердечнике и б) КПД ВЧ индуктора от мощности плазмы для различных частот при $l_{pl} = 60\text{см}$, $D = 2\text{см}$, $S_{fer} = 4\text{ см}^2$.

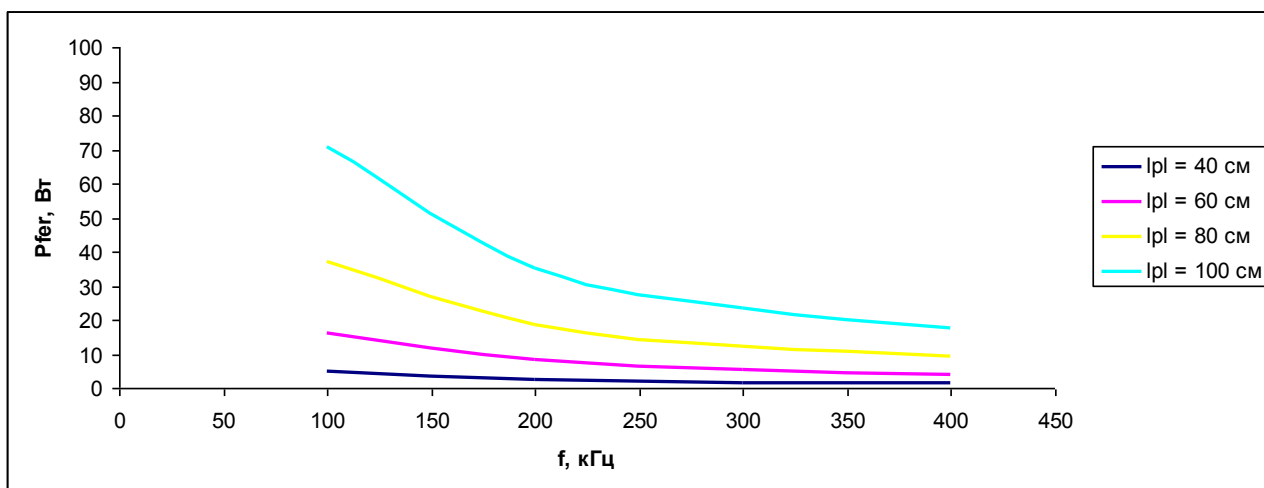
С увеличением мощности лампы мощность потерь в магнитопроводе P_{fer} падает из-за уменьшения магнитного поля в нем. На мощности $P > 250\text{ Вт}$ мощность потерь составляет не более 5% от мощности лампы. В результате КПД ВЧ индуктора на мощностях лампы 300-400 Вт весьма высок и составляет около 95%.

3.5. Влияние частоты на P_{fer} и КПД ВЧ индуктора.

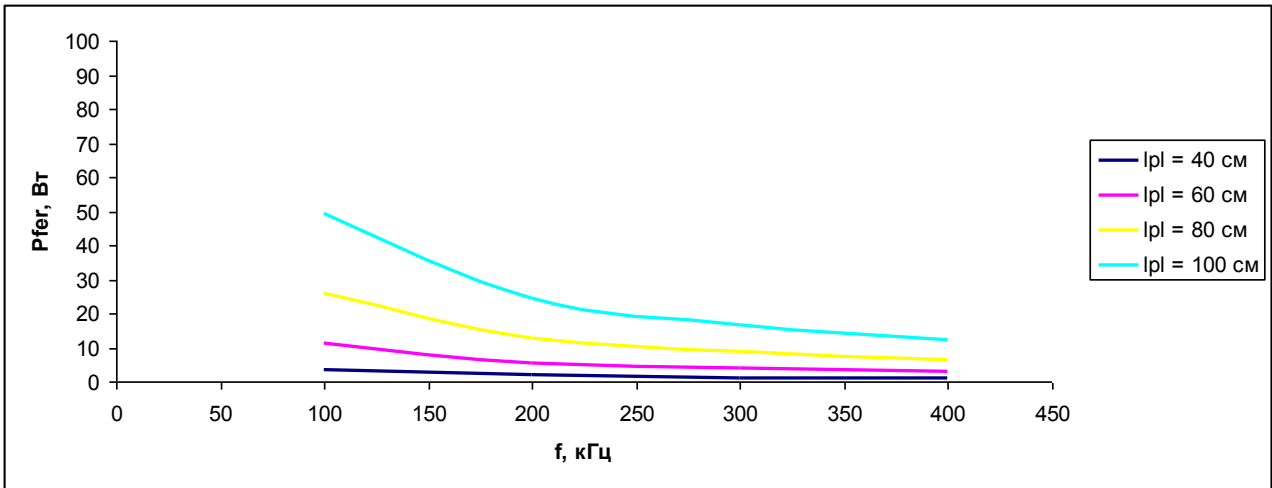
На нижеприведенных зависимостях представлены потери мощности в ферритовом сердечнике и КПД ВЧ индуктора от частоты при различных длинах плазменного витка и для разных диаметров на мощности 100Вт (рисунок 3-17, 3-18) и на мощности 400Вт (рисунок 3-19, 3-20)



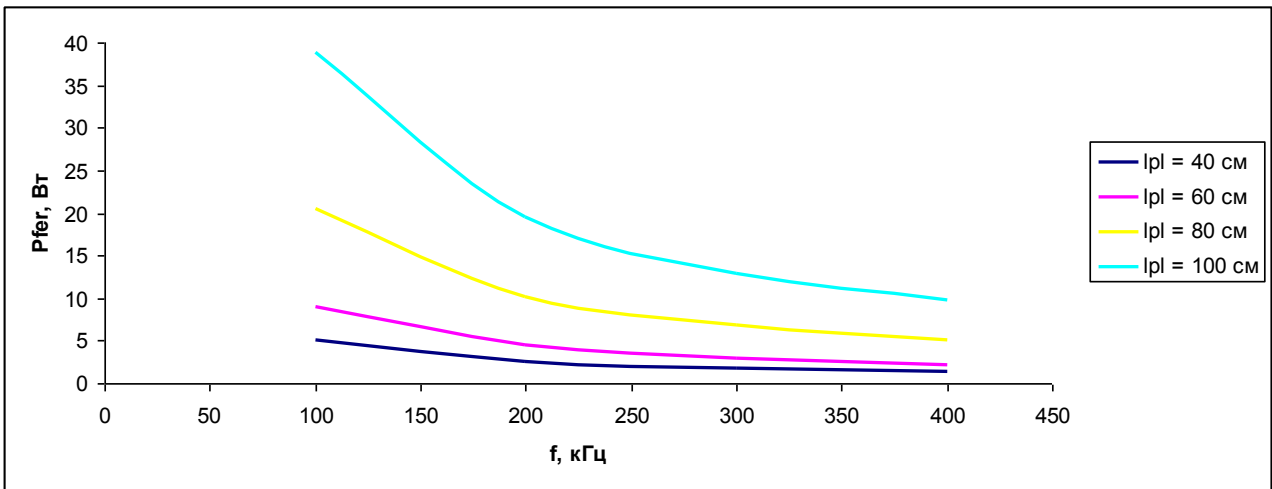
а)



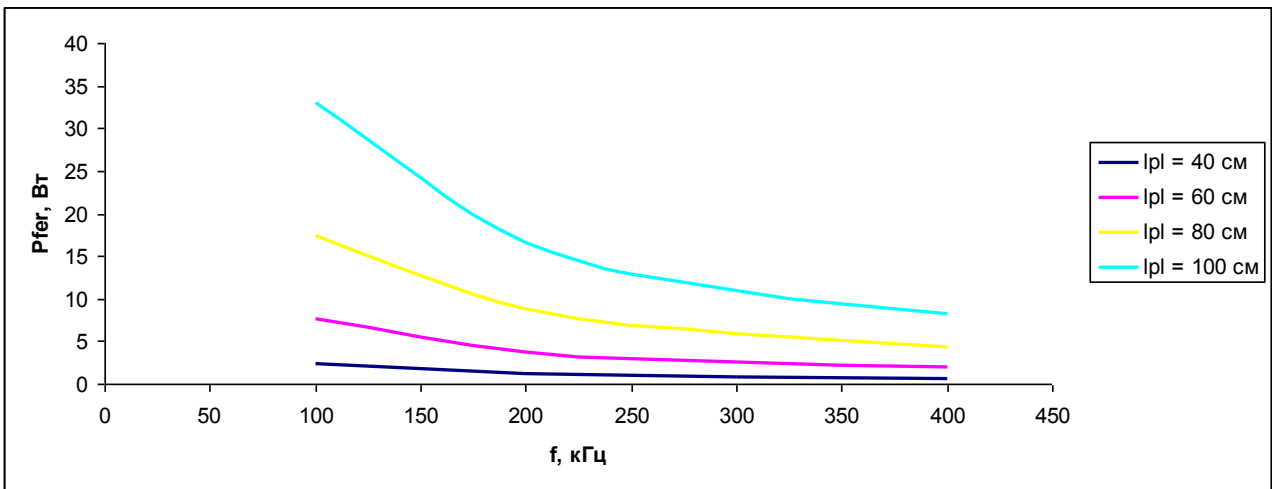
б)



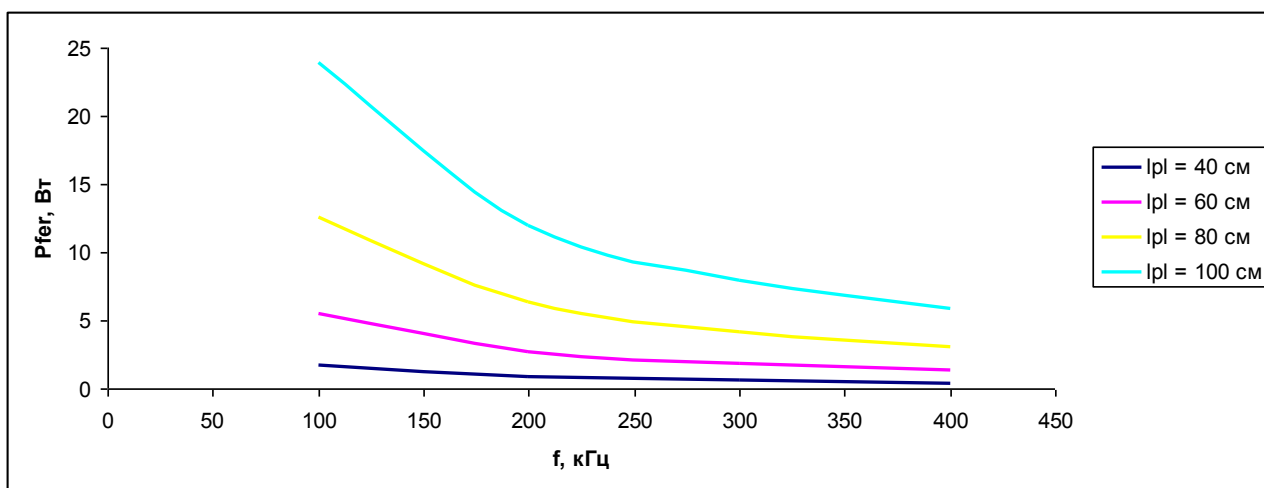
В)



Г)



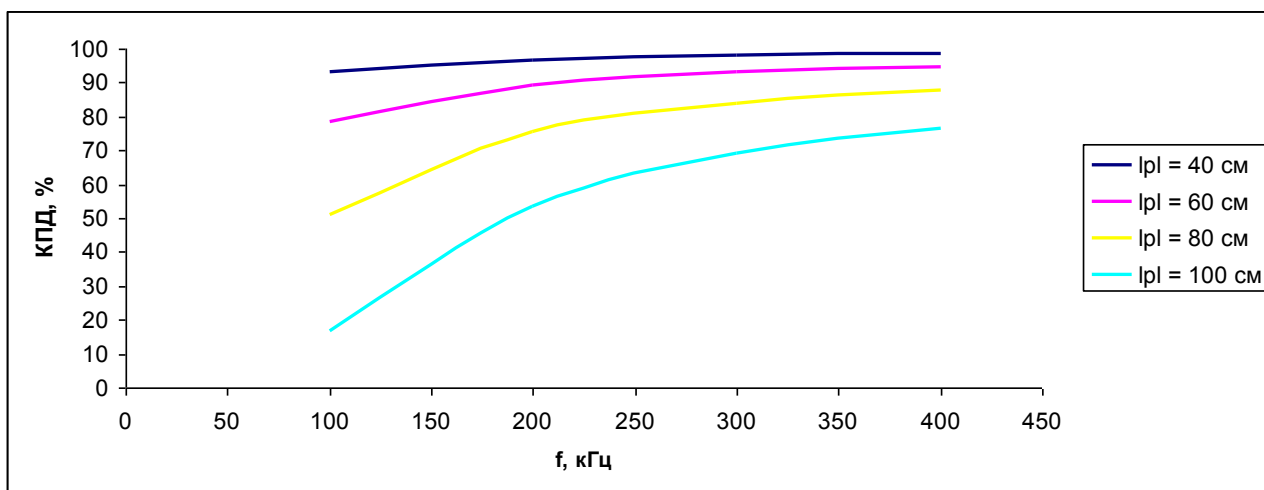
Д)



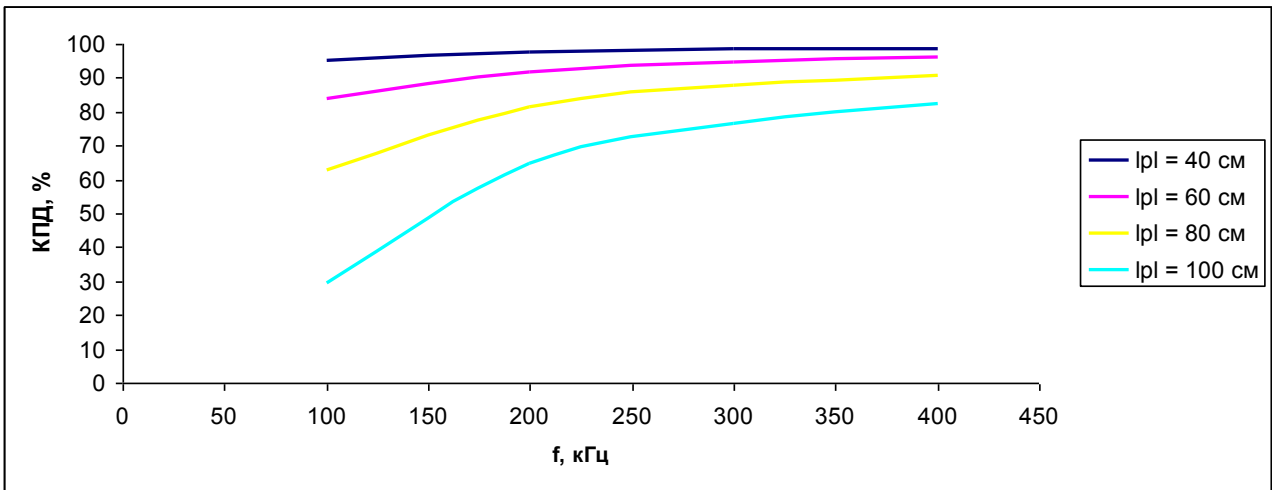
е)

Рис. 3-13. Зависимость потерь в сердечнике от частоты для различных длин плазменного витка при $S = 4\text{см}^2$, $P = 100\text{ Вт}$, а) $D = 1,5\text{см}$ б) $D = 2\text{см}$ в) $D = 3\text{см}$ г) $D = 4\text{см}$ д) $D = 5\text{см}$ е) $D = 8\text{см}$

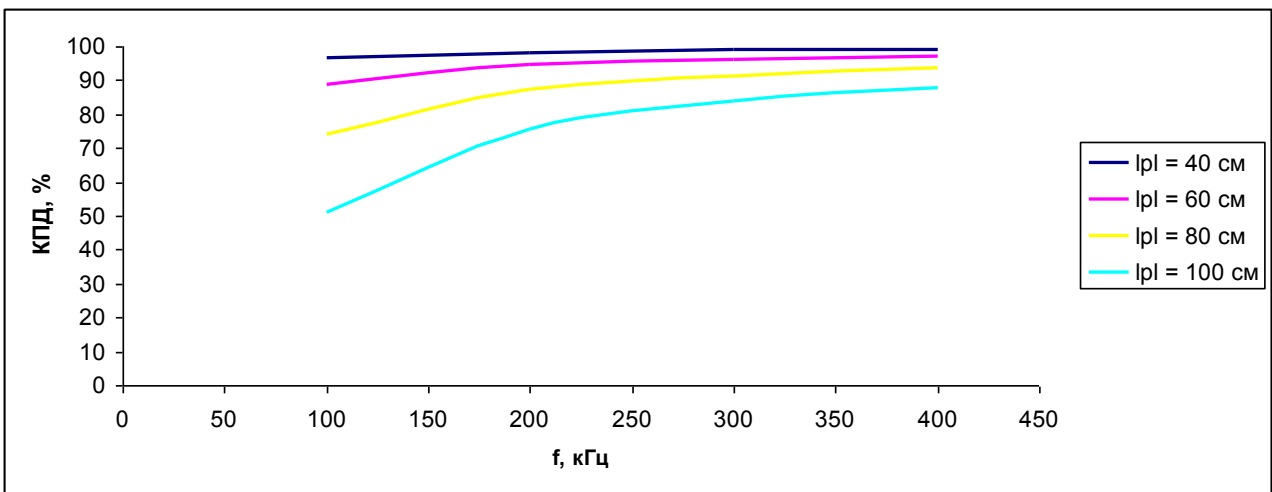
При увеличении диаметра потери в сердечнике уменьшаются. При мощности лампы 100 Вт для достижения малых потерь необходимо использовать или маленькие диаметры трубки и короткие (1,5 см и длина 40 см) или большие диаметры. Снижение потерь происходит при частоте 250кГц и выше.



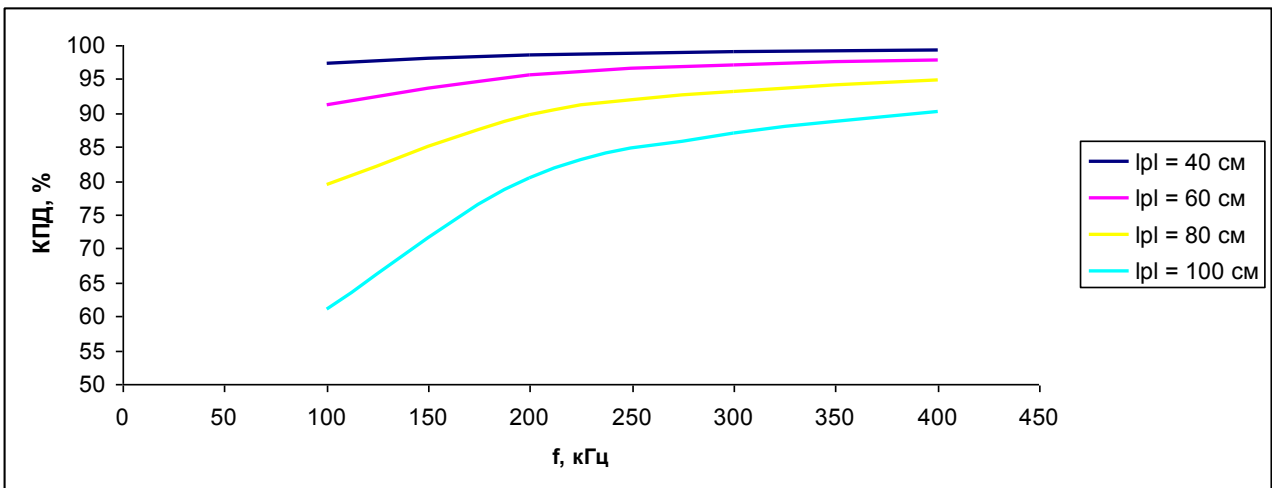
а)



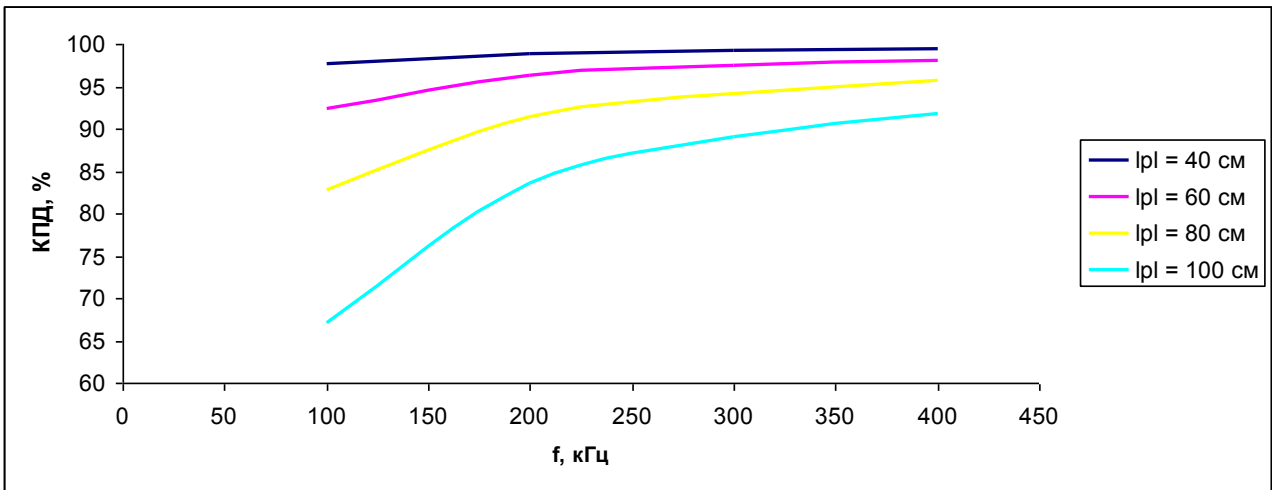
б)



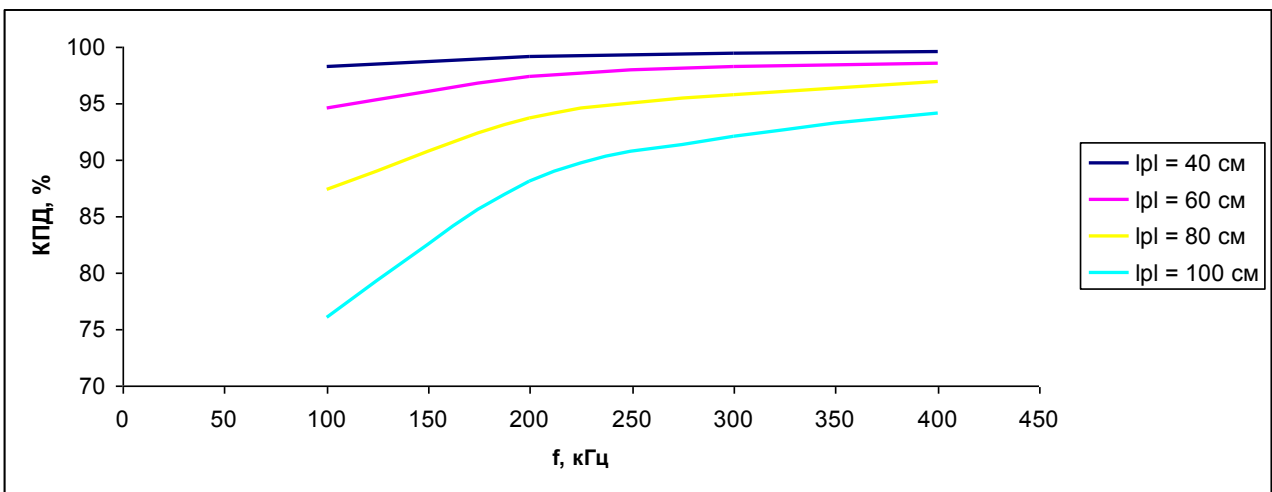
в)



г)

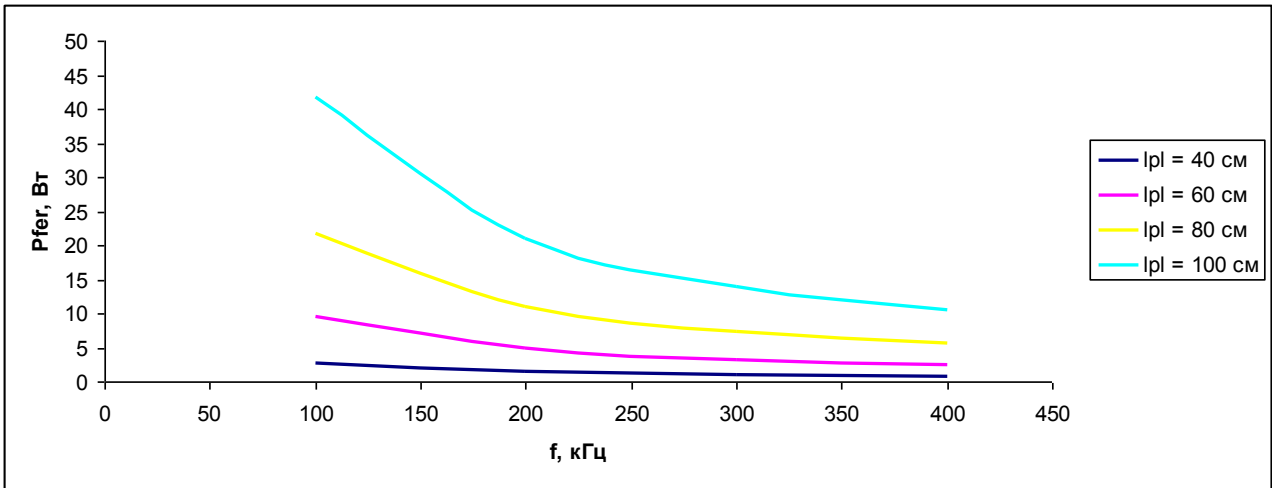


д)

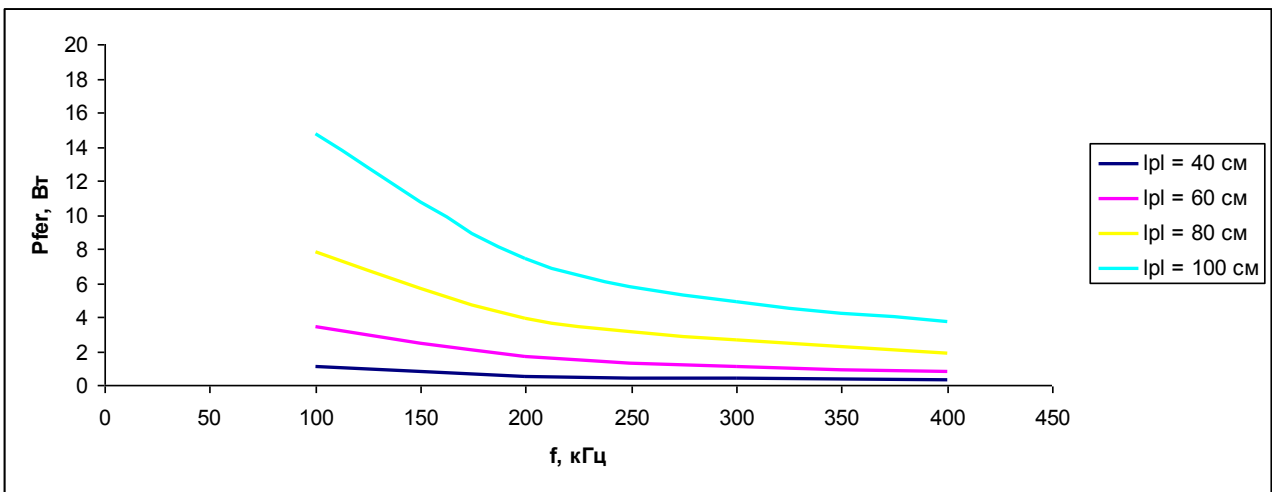


е)

Рис. 3-14. Зависимость КПД ВЧ индуктора от частоты для различных длин плазменного витка при $S = 4\text{см}^2$, $P = 100\text{ Вт}$, а) $D = 1,5\text{см}$ б) $D = 2\text{см}$ в) $D = 3\text{см}$ г) $D = 4\text{см}$ д) $D = 5\text{см}$ е) $D = 8\text{см}$



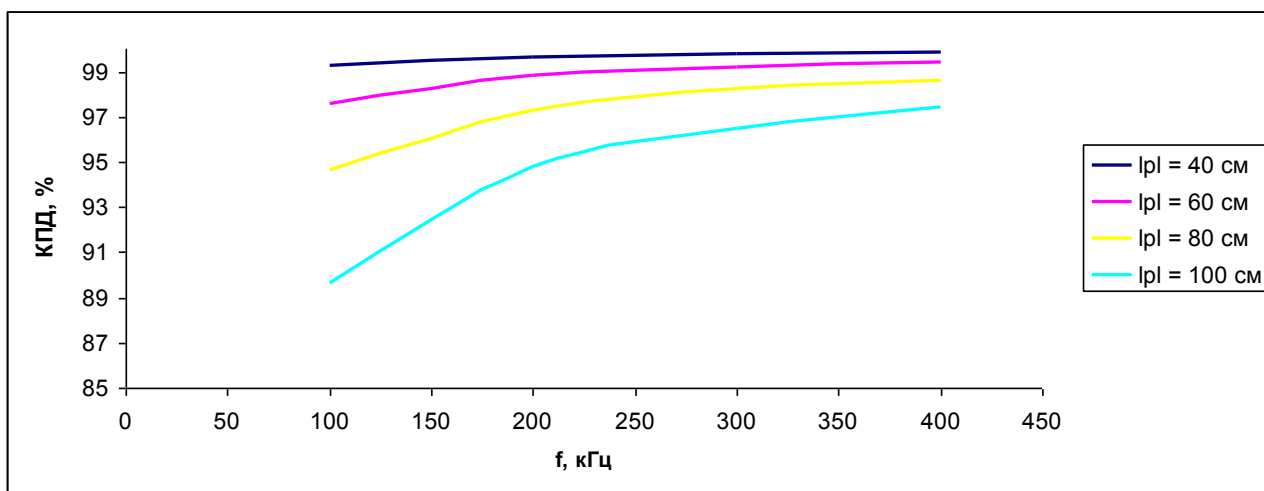
а)



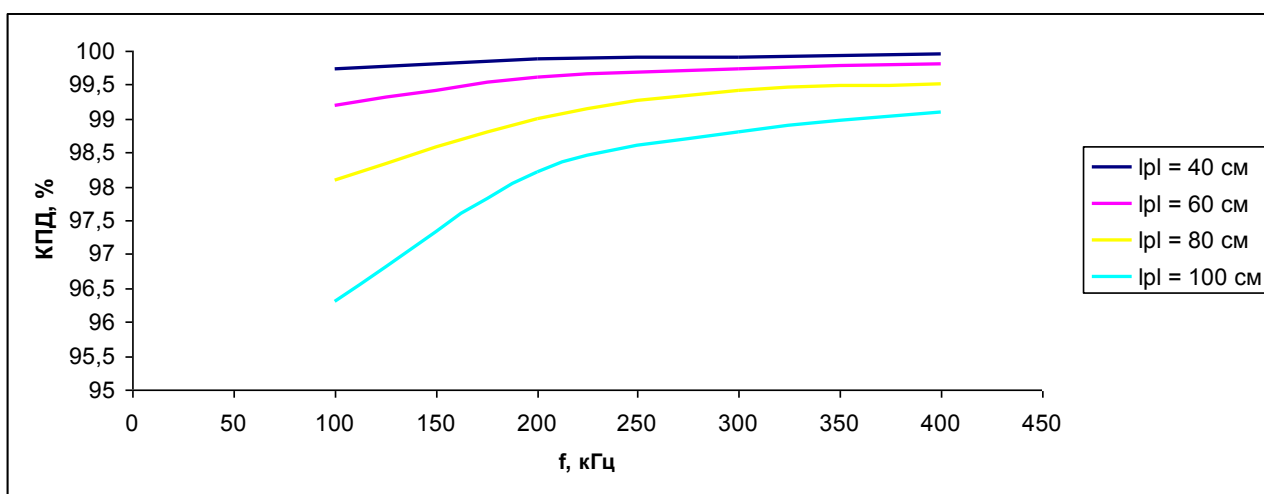
б)

Рис. 3-15. Зависимость потерь в сердечнике от частоты для различных длин плазменного витка при $S = 4\text{см}^2$, $P = 400\text{ Вт}$, а) $D = 1,5\text{см}$ б) $D = 5\text{см}$

Для достижения малых потерь при мощности лампы 400Вт необходимо использовать большие диаметры разрядной трубки.



а)



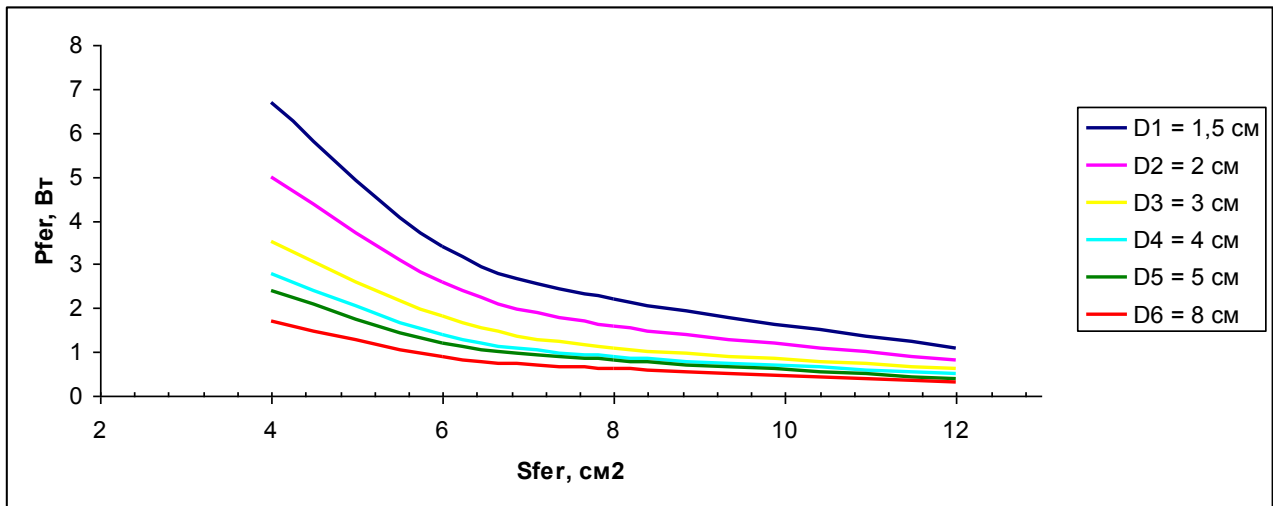
б)

Рис. 3-16. Зависимость КПД ВЧ индуктора от частоты для различных длин плазменного витка при $S = 4\text{см}^2$, $P = 100\text{ Вт}$, а) $D = 1,5\text{см}$ б) $D = 5\text{см}$

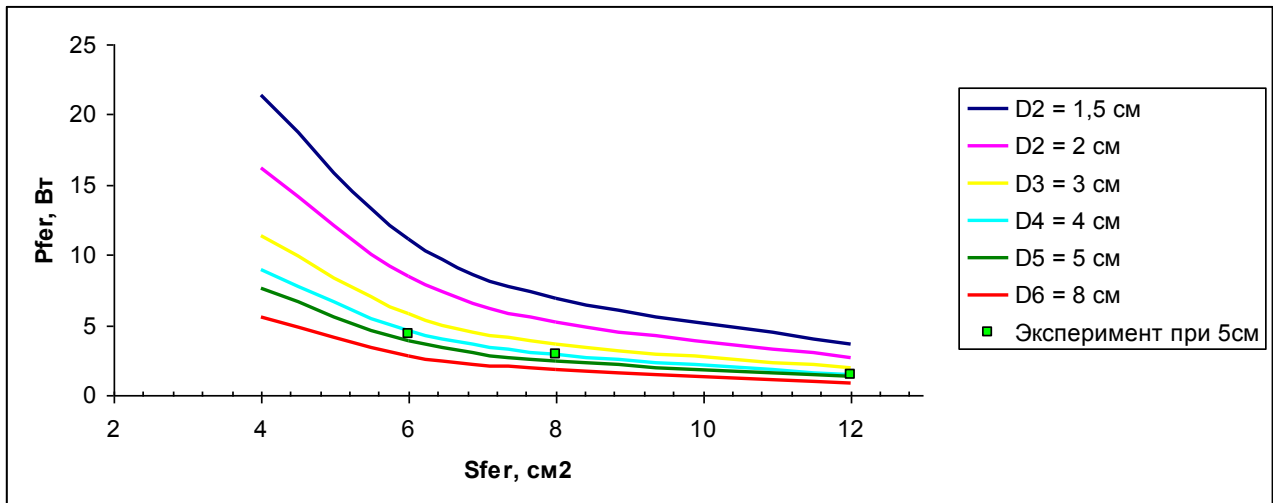
Чем ниже частота ВЧ поля, тем сильнее спадает напряженность ВЧ электрического поля. Тогда уменьшается индуцированное напряжение на трубке и напряжение на катушке индуктивности, что приводит к уменьшению магнитной индукции и, следовательно, к снижению мощности потерь в индукторе и увеличению КПД. На частотах $f > 250\text{ кГц}$ КПД ВЧ индуктора достигает порядка 95-98%.

3.6. Влияние сечения феррита на P_{fer} и на КПД ВЧ индуктора.

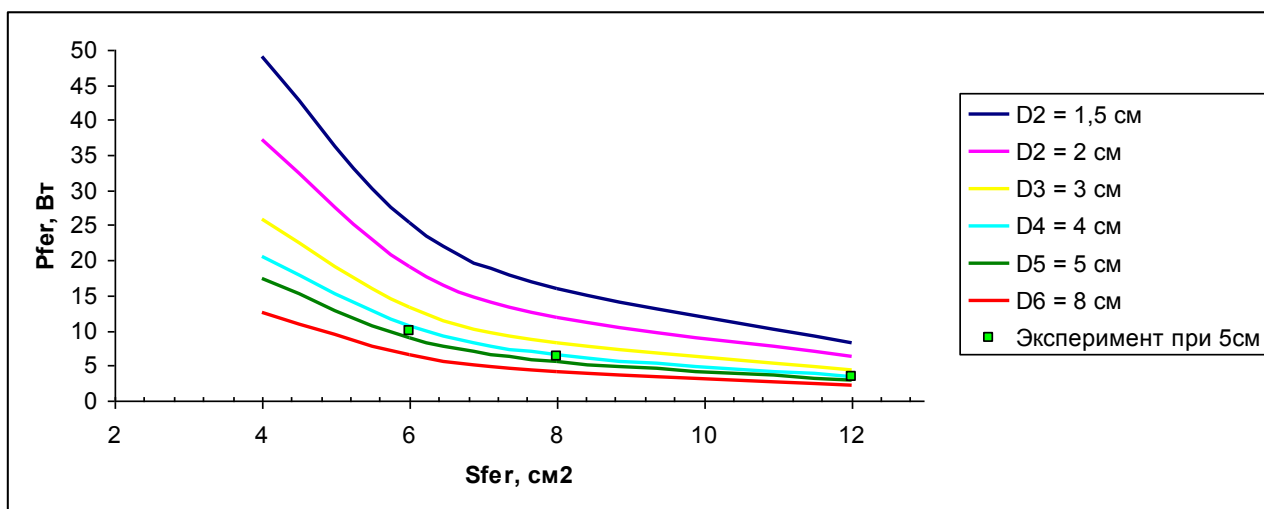
Расчет потерь мощности в ферритовом сердечнике проведен при различных диаметрах 1,5-8см и при разных длинах плазменного витка. На рисунках 3-21, 3-22 представлены зависимости мощности потерь и КПД ВЧ индуктора при мощности 100Вт соответственно.



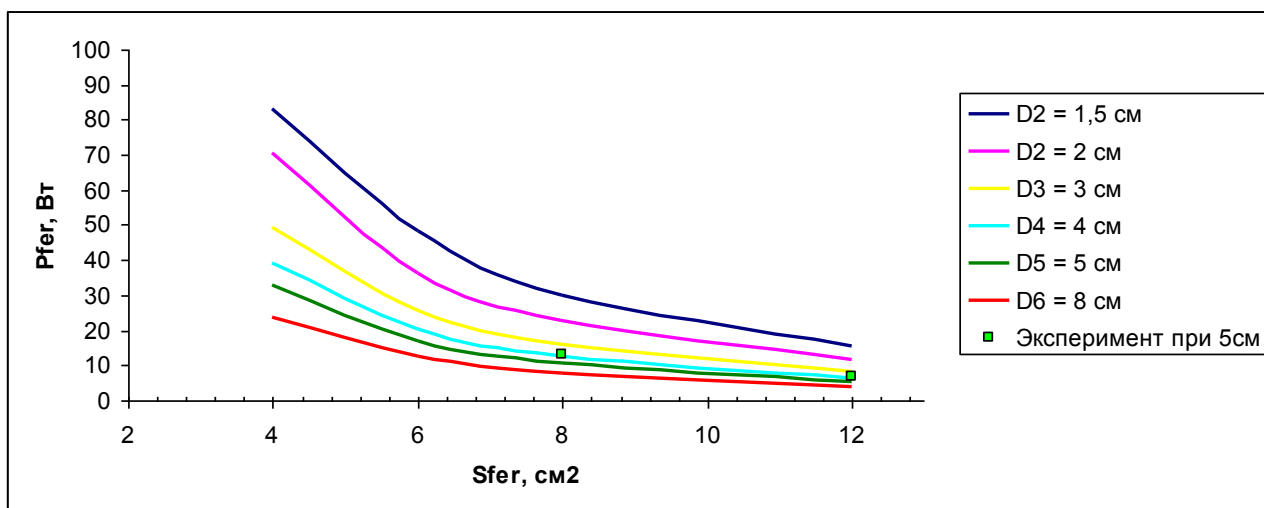
a)



б)



в)



г) Рис. 3-17. Зависимость потерь в сердечнике от сечения феррита для различных диаметров при $P_{л} = 100 \text{ Вт}$, $f = 100 \text{ кГц}$, а) $l_{pl} = 40 \text{ см}$ б) $l_{pl} = 60 \text{ см}$ в) $l_{pl} = 80 \text{ см}$ г) $l_{pl} = 100 \text{ см}$

При коретеньких трубках потери мощности очень низкие при любых диаметрах и сечениях магнитопровода. Но нужно учитывать, что на коротких трубках нужно использовать только минимальные сечения, исходя из конструктивных соображений. При больших сечениях феррита 12 см^2 потери самые маленькие. Дальнейшее увеличение сечения бесполезно, но лишь будет блокировать излучение.

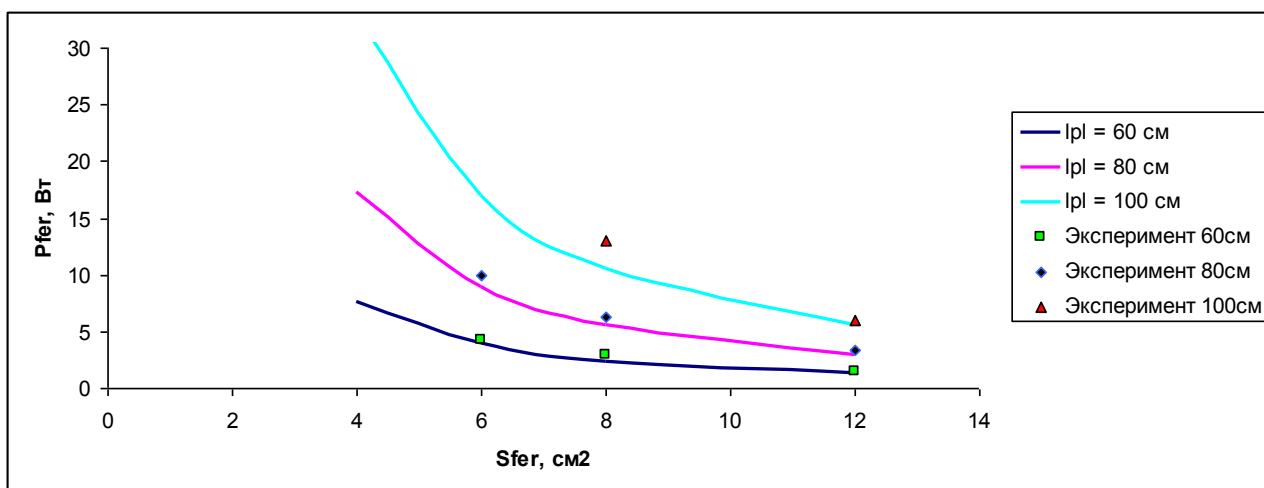
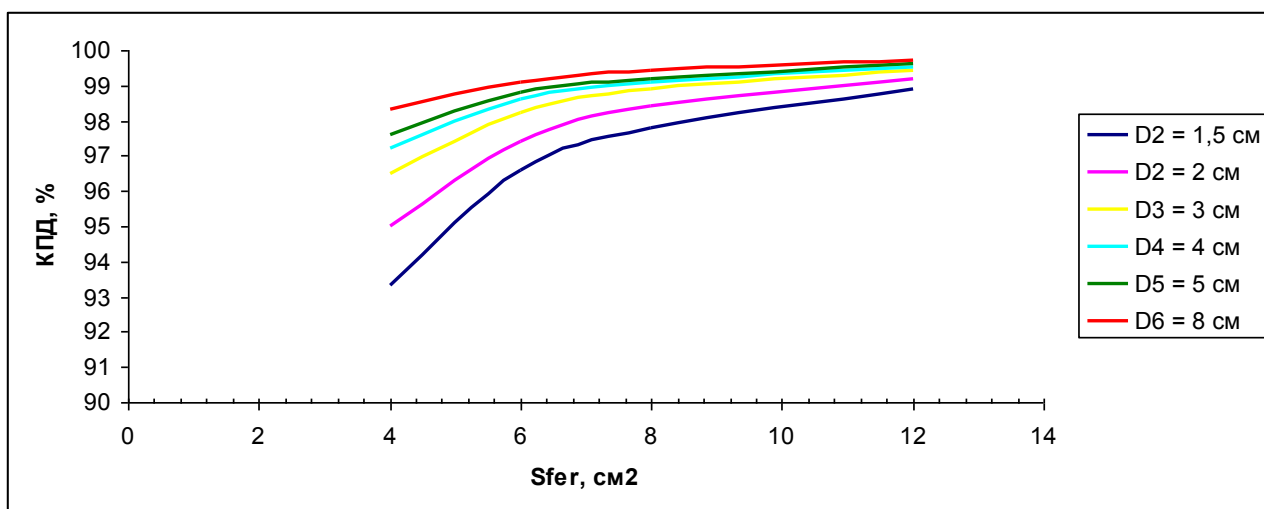
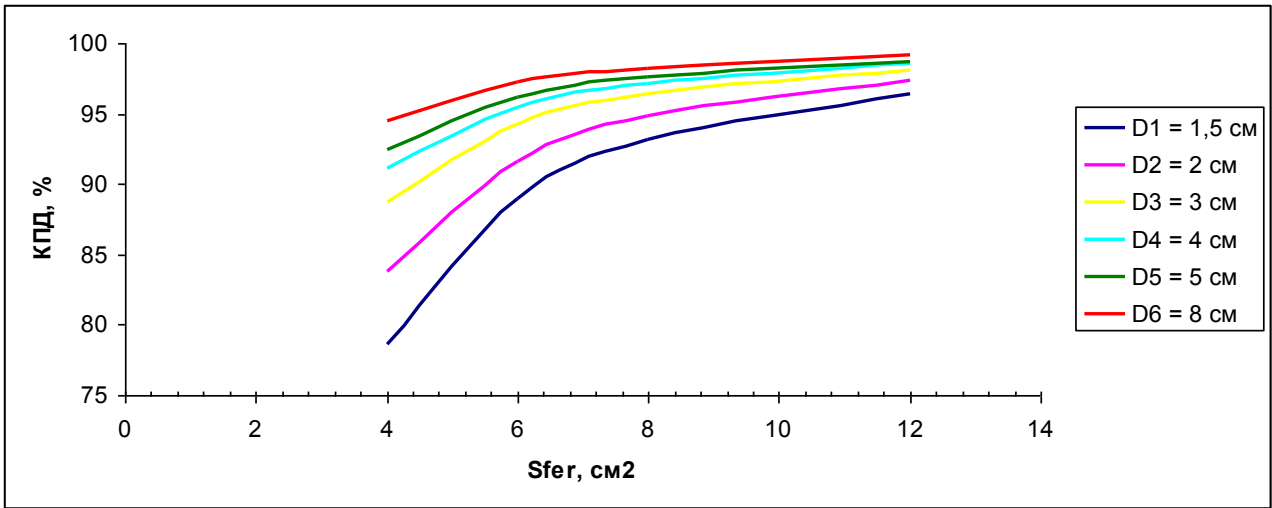


Рис. 3-18. Зависимость потерь в сердечнике от сечения феррита для длин плазменного витка при $P_{л} = 100$ Вт, $f = 100$ кГц, $D = 5$ см

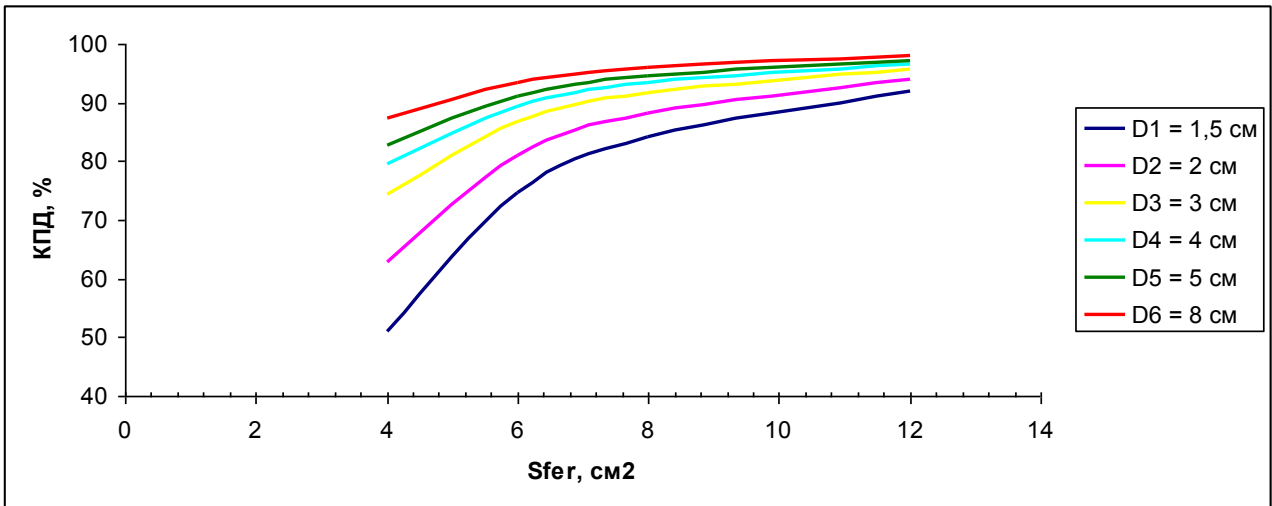
На рисунке 3-18 представлена зависимость потерь в сердечнике от сечения феррита, полученная при расчете, и экспериментальные точки, полученные Поповом О.А. Расчетные данные и экспериментальные находятся в хорошем согласии.



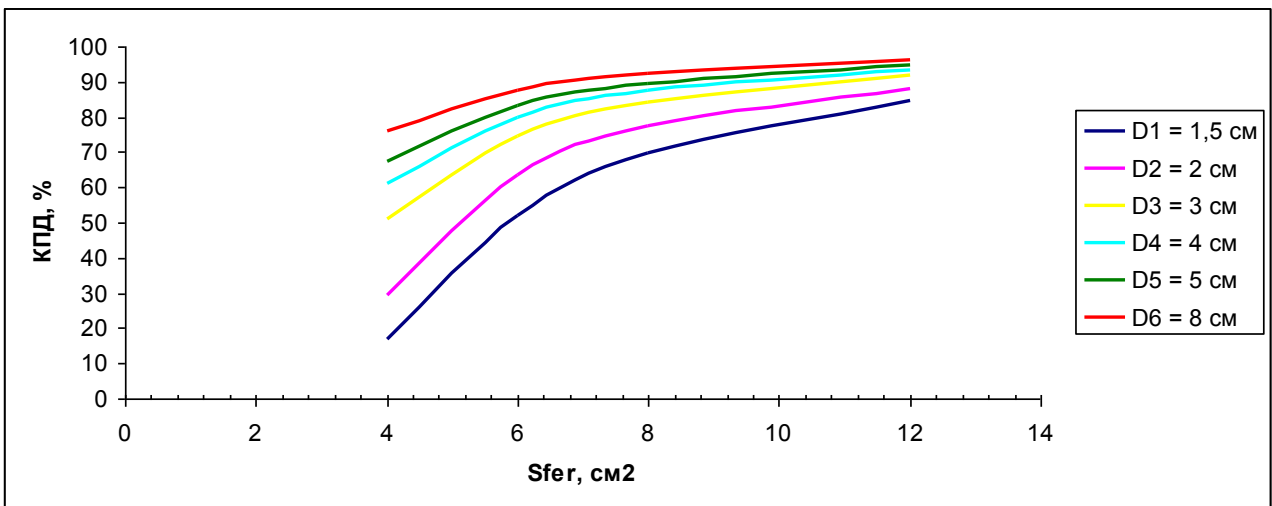
a)



б)



в)



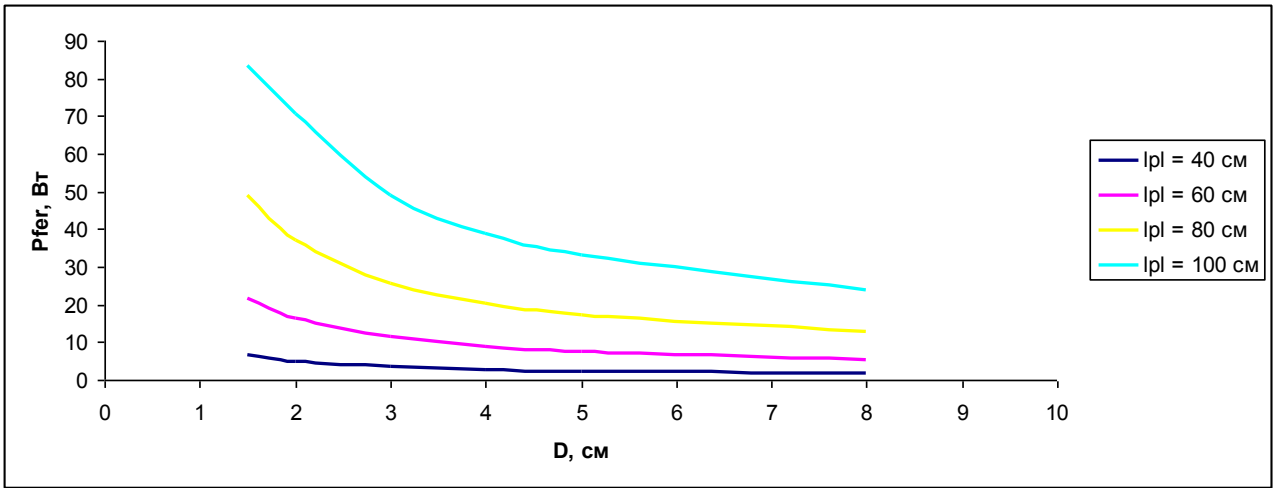
г) Рис. 3-19. Зависимость КПД ВЧ индуктора от сечения феррита для различных диаметров при $P_{л} = 100\text{Вт}$, $f = 100\text{ кГц}$, а) $l_{pl} = 40\text{см}$ б) $l_{pl} = 60\text{см}$ в) $l_{pl} = 80\text{см}$ г) $l_{pl} = 100\text{см}$

Нетрудно установить, что мощность потерь в ВЧ индукторе обратно пропорциональна площади сечения магнитопровода S_{ferr} и при небольших значениях она весьма значительна. Уменьшение сечения магнитопровода приводит к росту мощности потерь в нем. Высокие значения мощности потерь в сердечнике, достигающие 20% от мощности лампы 100Вт, неприемлемы для энергоэффективных индукционных ламп. КПД ВЧ индуктора в ней очень низок, составляет всего 80%. В индукционной лампе с магнитопроводом большего сечения 12 см^2 мощность потерь в магнитопроводe не столь велика. КПД ВЧ индуктора высок, составляет около 95%. Дальнейшее увеличение сечения магнитопровода нецелесообразно, так как незначительное увеличение КПД ВЧ индуктора «компенсируется» сокращением излучающей поверхности разрядной трубки из-за блокировки поверхностью магнитопровода.

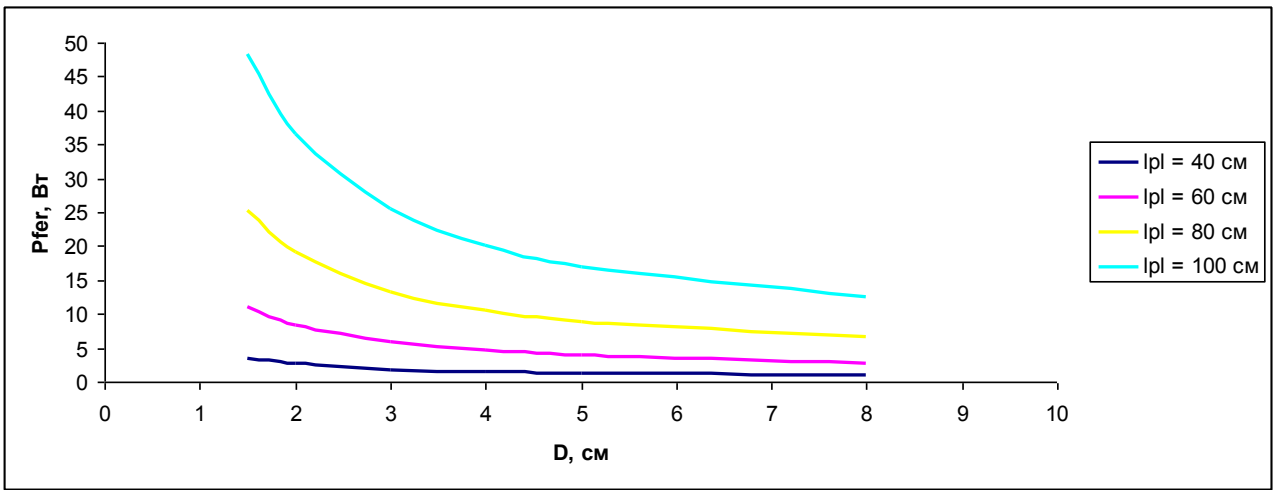
На рисунке 3-20 приведены рассчитанные зависимости потерь в магнитопроводe P_{fer} от площади его сечения трех индукционных ламп диаметром 5см с разной длиной плазменного витка $l_{pl} = 60, 80, 100 \text{ см}$. На этом же графике приведены экспериментальные значения P_{fer} , которые для всех трех исследованных ламп дают хорошее согласие ($\pm 5\%$) с рассчитанными.

3.7. Влияние диаметра разрядной трубки на P_{fer} и на КПД ВЧ индуктора.

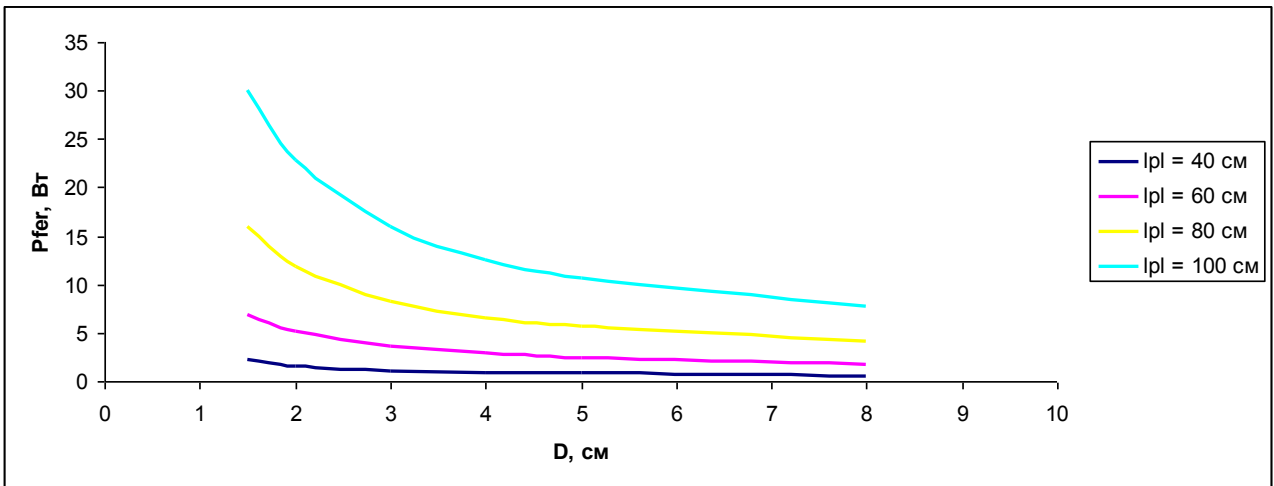
Представлены зависимости потерь мощности в ферритовом сердечнике и КПД ВЧ индуктора от диаметра разрядной трубки при различных длинах плазменного витка и для разных сечений сердечников $4\text{-}12\text{см}^2$ на мощности 100Вт (рисунок 3-24, 3-25)



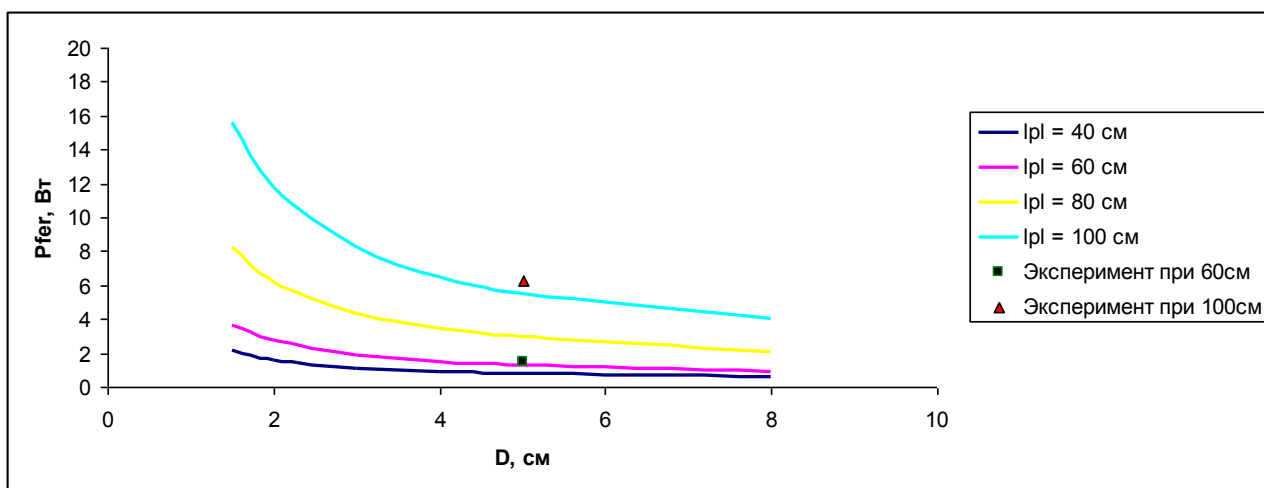
a)



b)



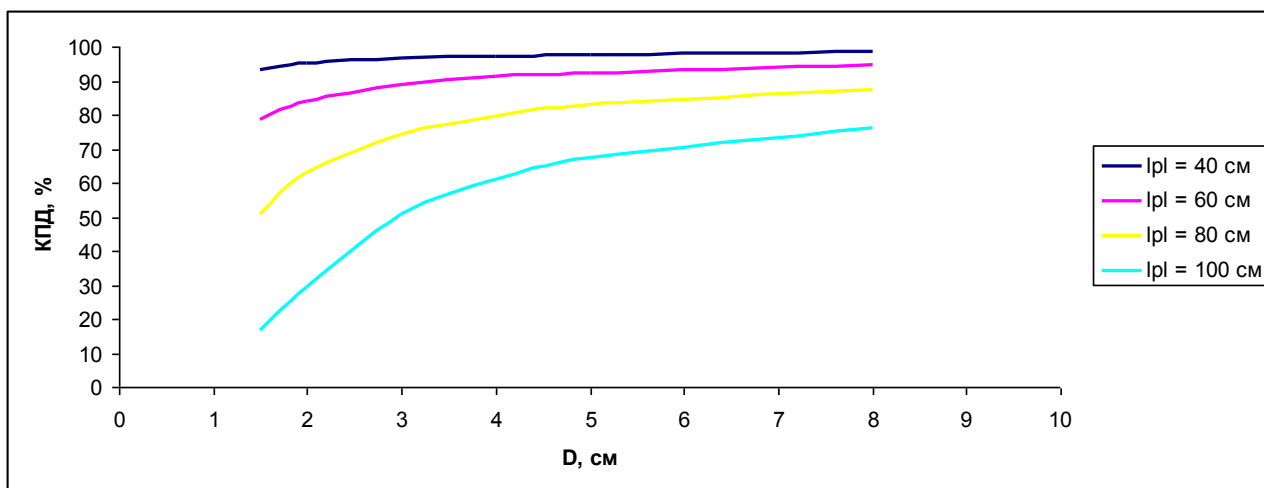
B)



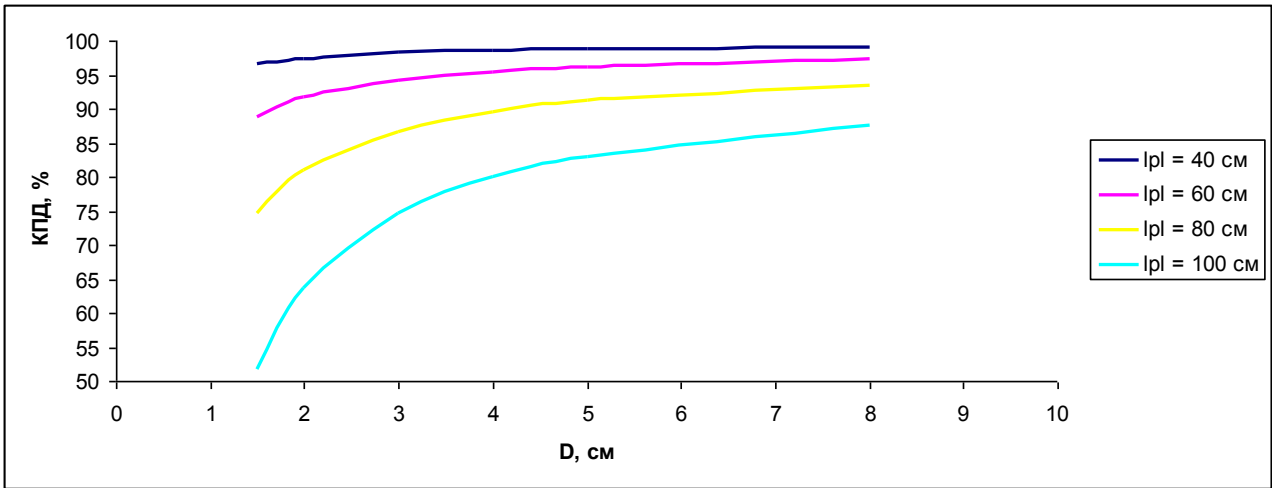
г)

Рис. 3-20. Зависимость потерь в сердечнике от диаметра трубки для различных длин плазменных путей при $P_{\text{л}} = 100\text{Вт}$, $f = 100\text{ кГц}$, а) $S = 4\text{см}^2$ б) $S = 6\text{см}^2$ в) $S = 8\text{см}^2$ г) $S = 12\text{см}^2$

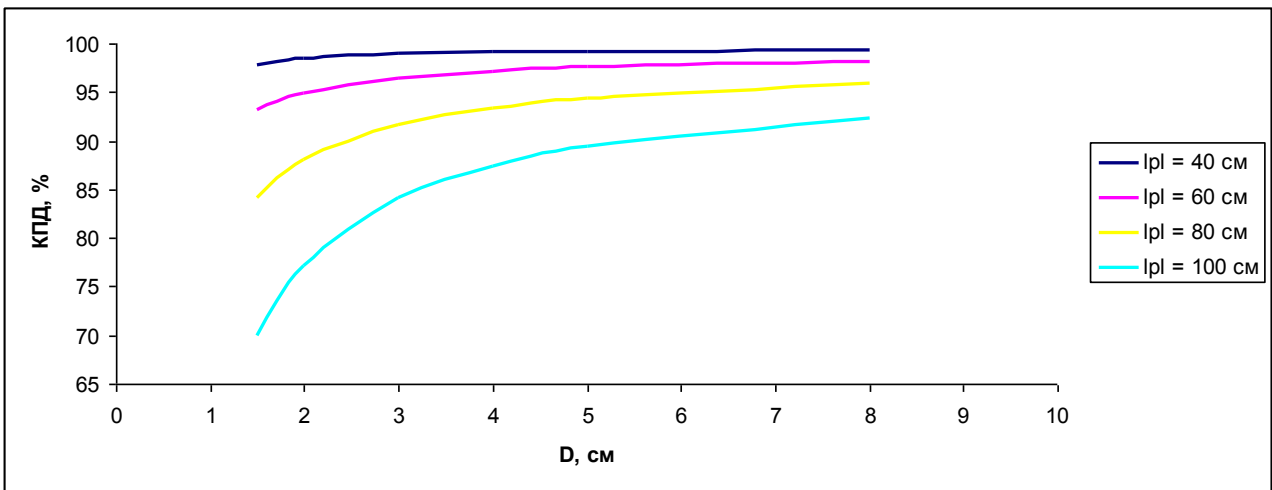
Зависимость потерь в сердечнике от диаметра разрядной трубки резко спадает при малых диаметрах, с их увеличением. На рисунке 3-20 сравниваются рассчитанные зависимости и экспериментальные, которые находятся в хорошем согласии.



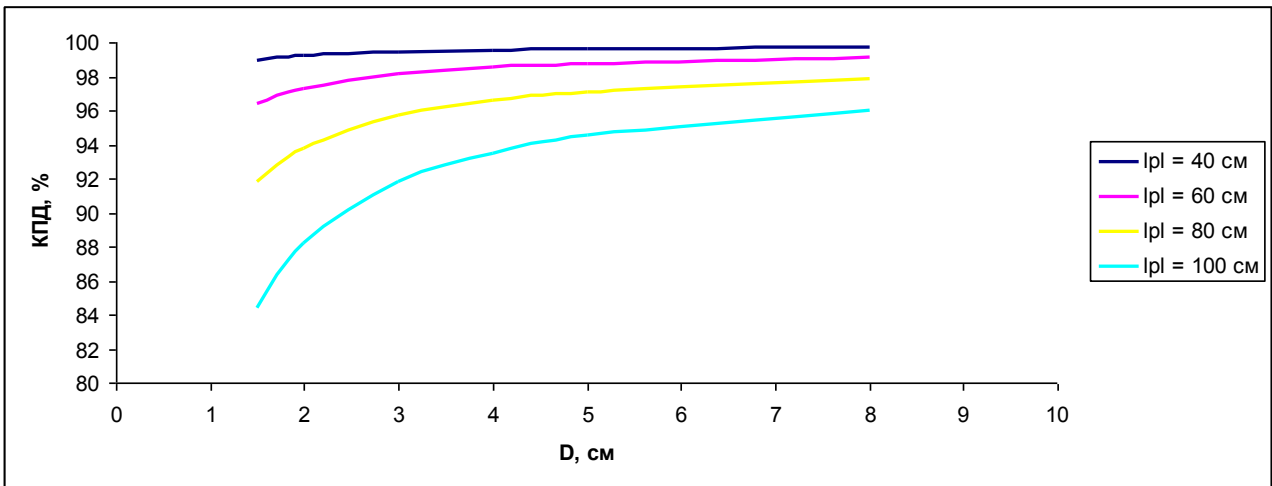
а)



б)



в)



г)

Рис. 3-21. Зависимость КПД ВЧ индуктора от диаметра трубки для различных длин плазменных путей при $P_{\text{н}} = 100\text{Вт}$, $f = 100\text{ кГц}$, а) $S = 4\text{см}^2$ б) $S = 6\text{см}^2$ в) $S = 8\text{см}^2$ г) $S = 12\text{см}^2$

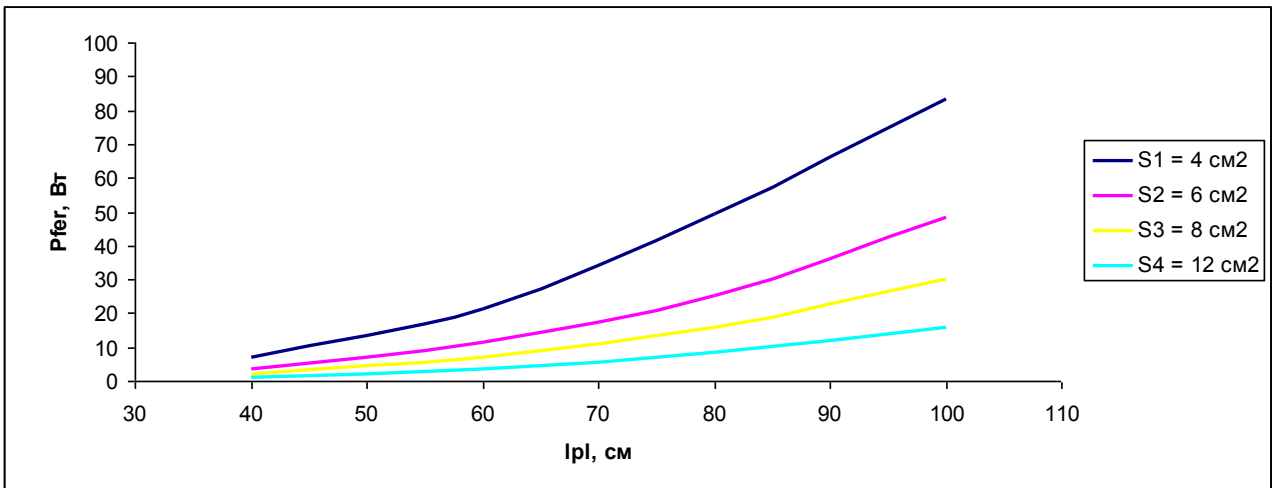
При малой толщине магнитопровода $a < D$ потери в нем уменьшаются с диаметром трубки как $P_{fer} \sim 1/D_t^{0,32}$. И лишь в трубках малого диаметра $D < 3$ см, или в лампах с магнитопроводом большой толщины $a > 3$ см и малой высоты $H = 1-2$ см потери мощности в магнитопроводе уменьшаются с ростом диаметра трубки как $P_{fer} \sim 1/D_t^{1,32}$.

На рисунке 3-22 (г) приведены рассчитанные зависимости мощности потерь в магнитопроводе P_{fer} от диаметра разрядной трубки D . Видно, что при малых значениях D потери в магнитопроводе резко снижаются с увеличением диаметра трубки, а при больших диаметрах трубки уменьшаются весьма медленно. Там же представлены экспериментальные данные мощности потерь в ВЧ индуктора P_{fer} , измеренные в индукционных лампах с разрядной трубкой диаметром $D = 5$ см и двумя магнитопроводами сечением $S_{fer} = 12$ см².

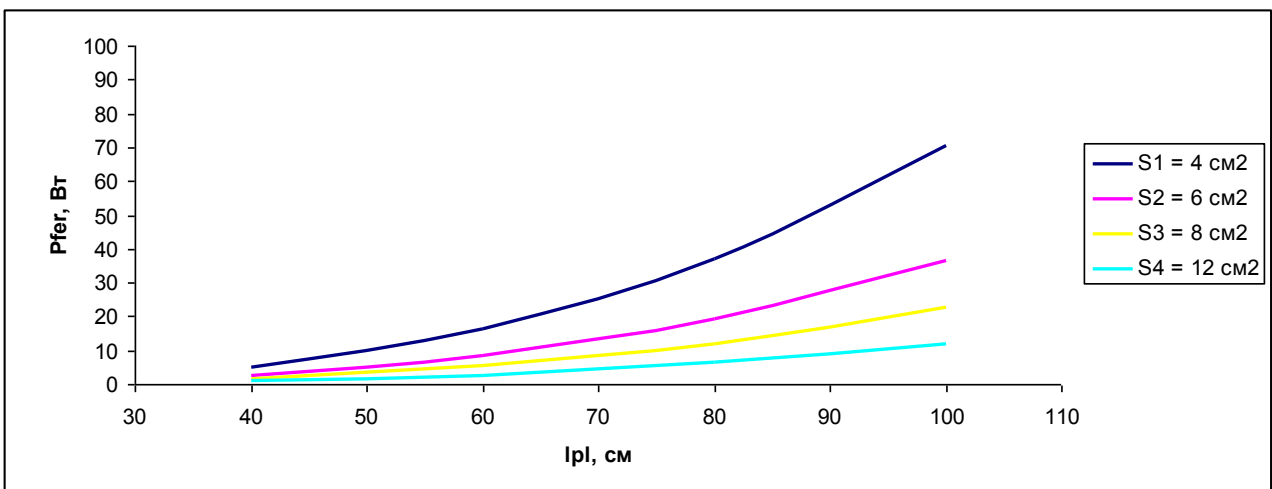
Экспериментальные значения P_{fer} обнаруживают хорошее согласие с рассчитанными значениями P_{fer} для обеих ламп. Уменьшение мощности потерь с увеличением диаметра разрядной трубки вызвано уменьшением напряженности ВЧ электрического поля: $E_{pl} \sim 1/D$. Уменьшение E_{pl} приводит к уменьшению ВЧ напряжения на плазменном витке $U_{pl} = E_{pl} * l_{pl}$. В результате, снижается ВЧ напряжение на индуктивной катушке U_c , уменьшается индукция магнитного поля в магнитопроводе B_{fer} и падает мощность потерь в магнитопроводе P_{fer} .

3.8. Влияние длины плазменного витка на P_{fer} и КПД ВЧ индуктора.

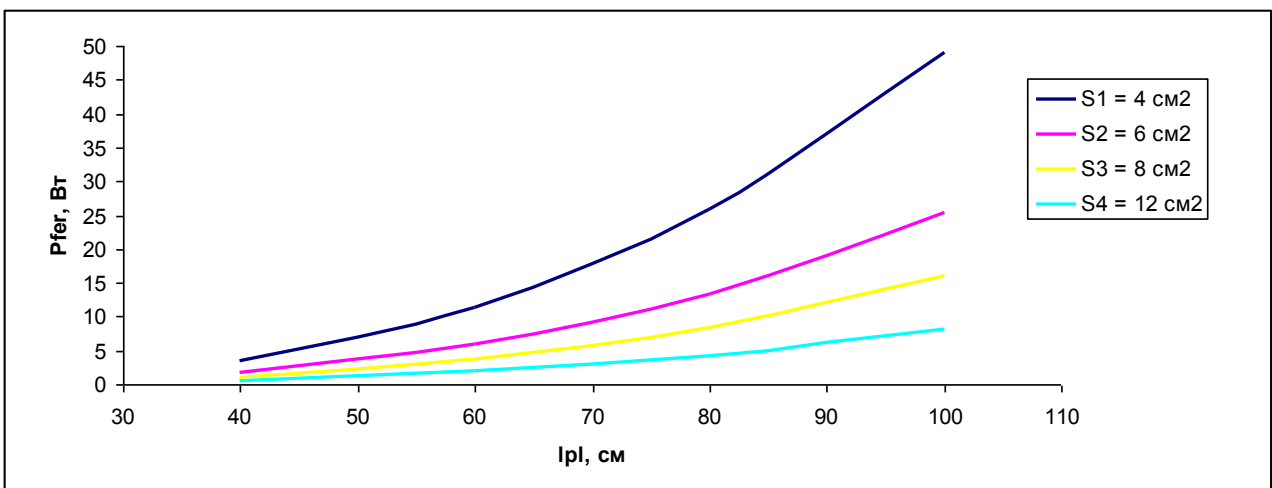
Расчет потерь мощности в ферритовом сердечнике проведен при различных сечениях 4-12 см² и при разных диаметрах 1,5-8 см. На рисунках 3-26, 3-27 представлены зависимости мощности потерь и КПД ВЧ индуктора при мощности 100 Вт соответственно.



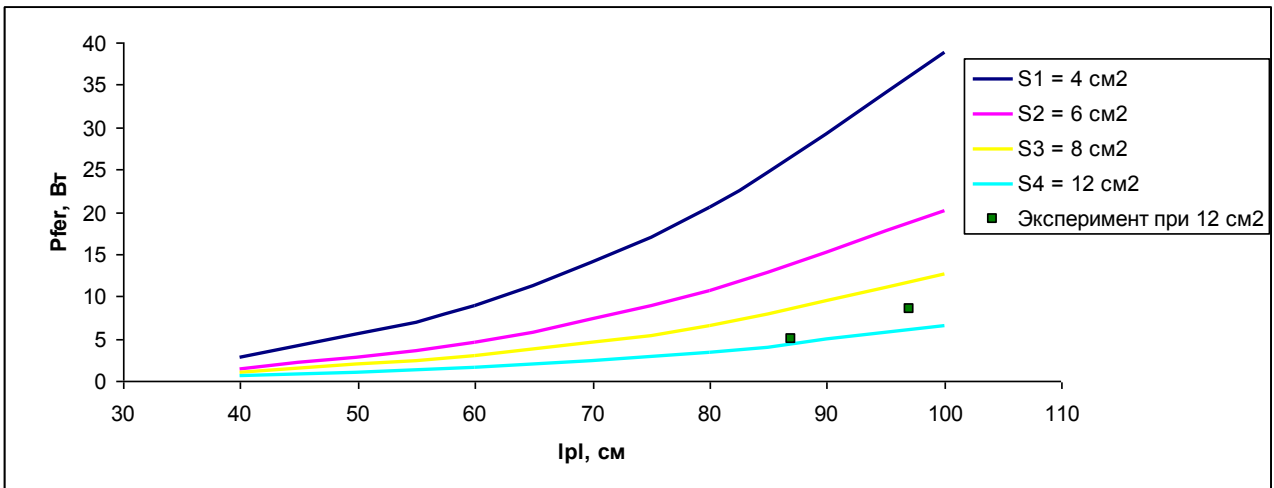
a)



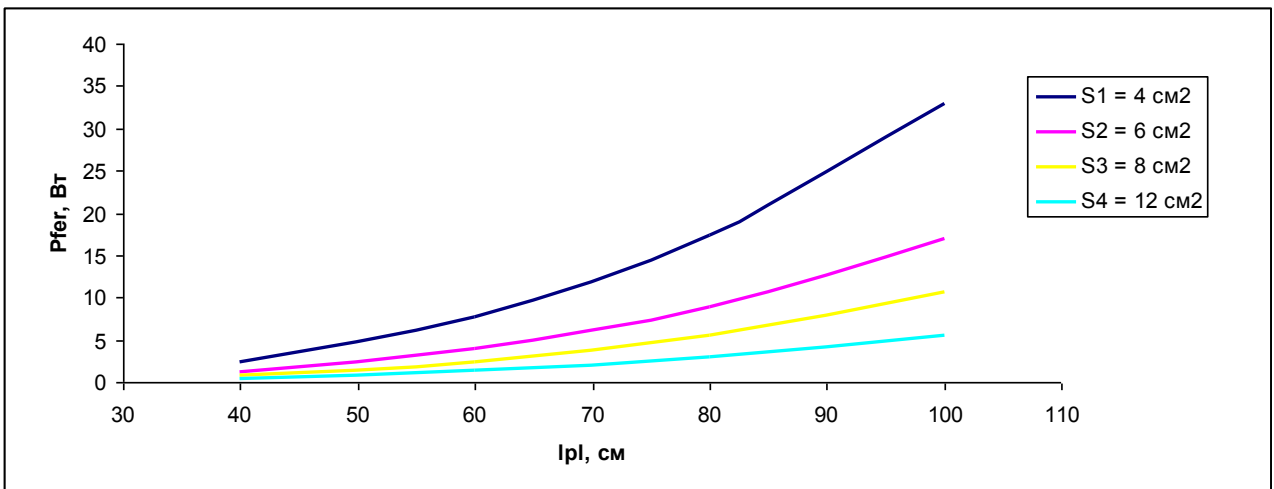
b)



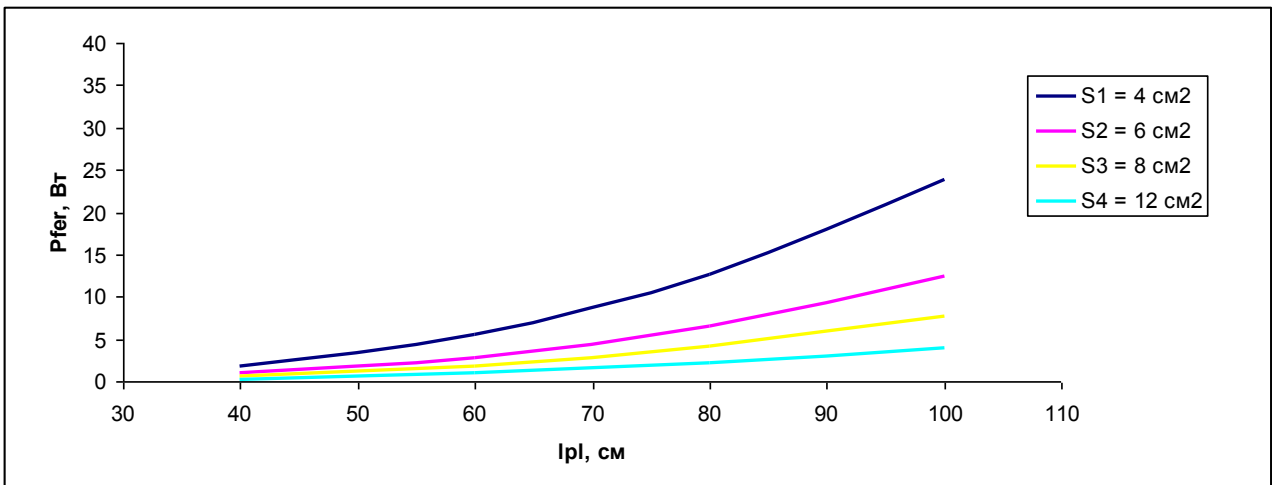
B)



Г)



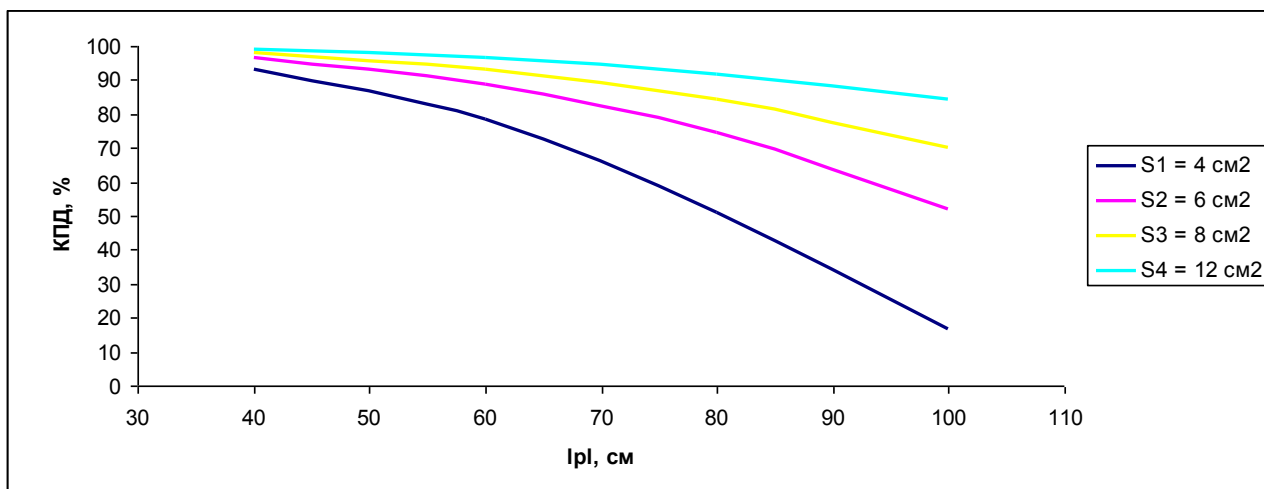
Д)



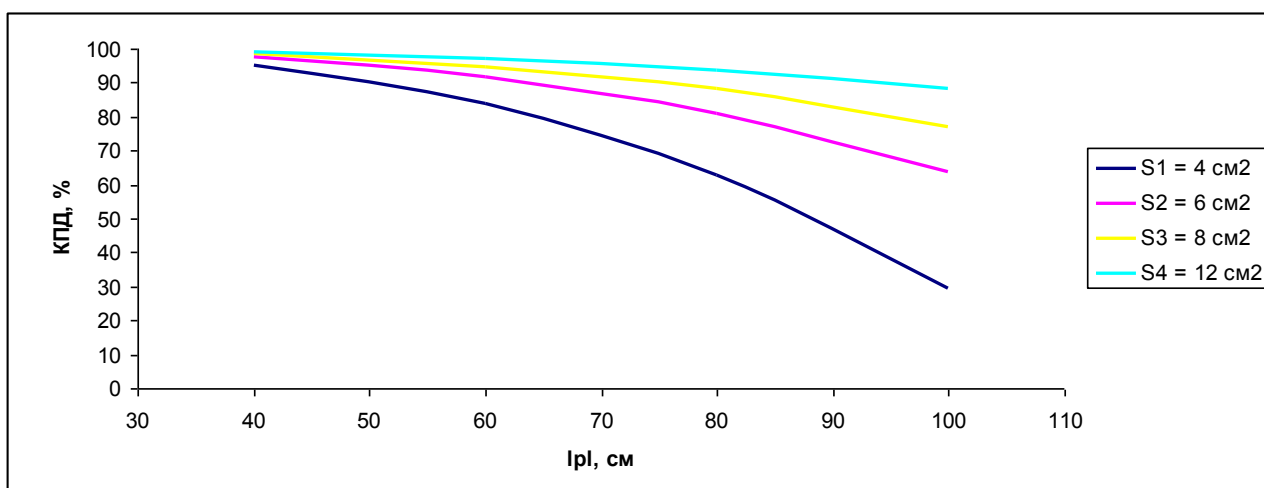
Е)

Рис. 3-22. Зависимость потерь в сердечнике от длины плазменного пути для различных сечений феррита при $P_{д} = 100\text{Вт}$, $f = 100\text{ кГц}$, а) $D = 1,5\text{см}$ б) $D = 2\text{см}$ в) $D = 3\text{см}$ г) $D = 4\text{см}$ д) $D = 5\text{см}$ е) $D = 8\text{см}$

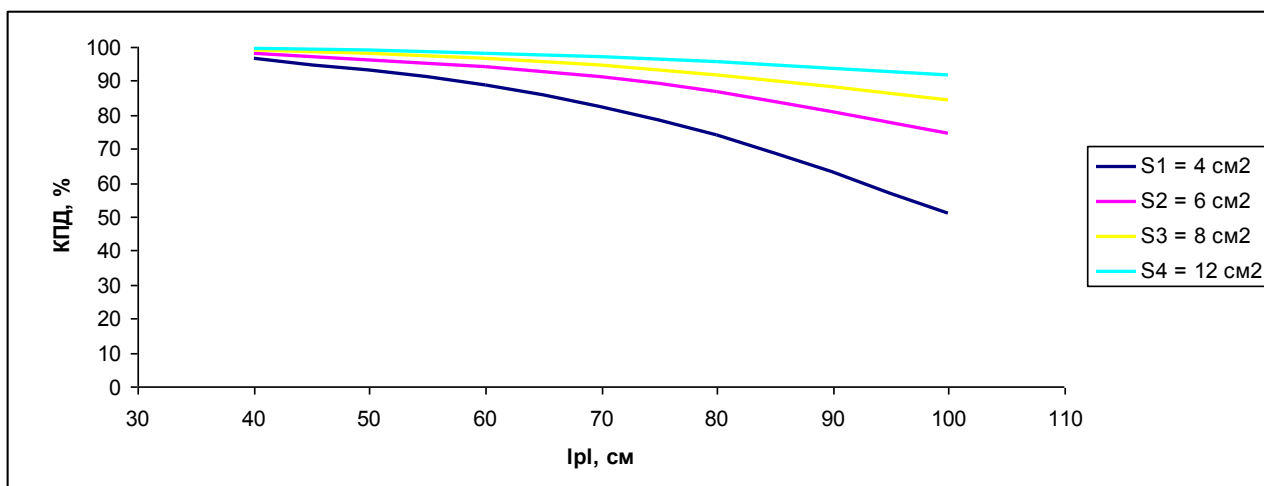
При увеличении длины плазменного витка увеличиваются потери в ферритном сердечнике. Чем короче трубка и меньше ее диаметр, тем больше нужно сечение феррита для достижения высокого КПД ВЧ индуктора.



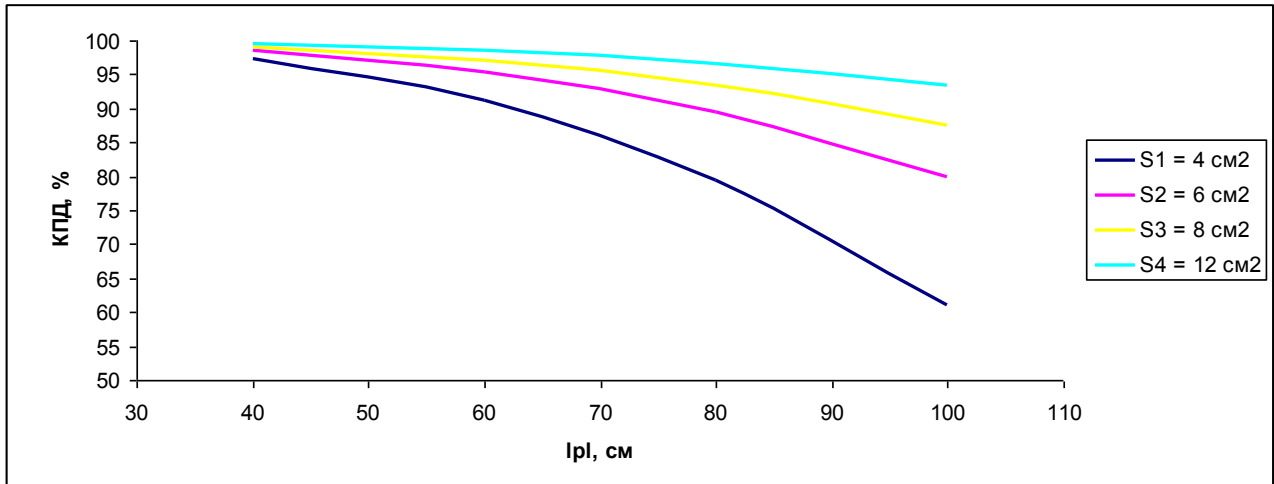
a)



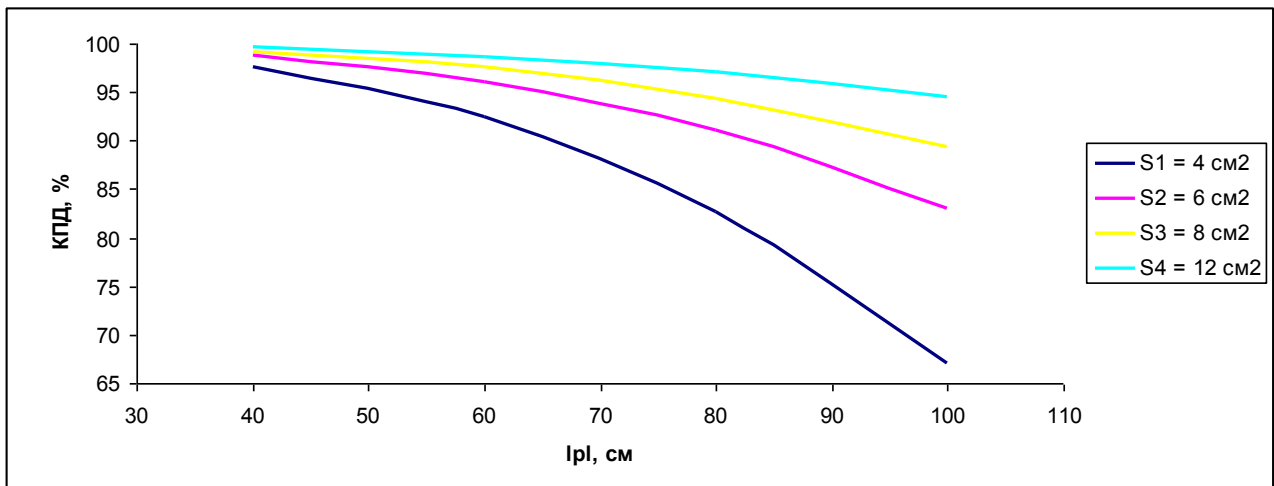
б)



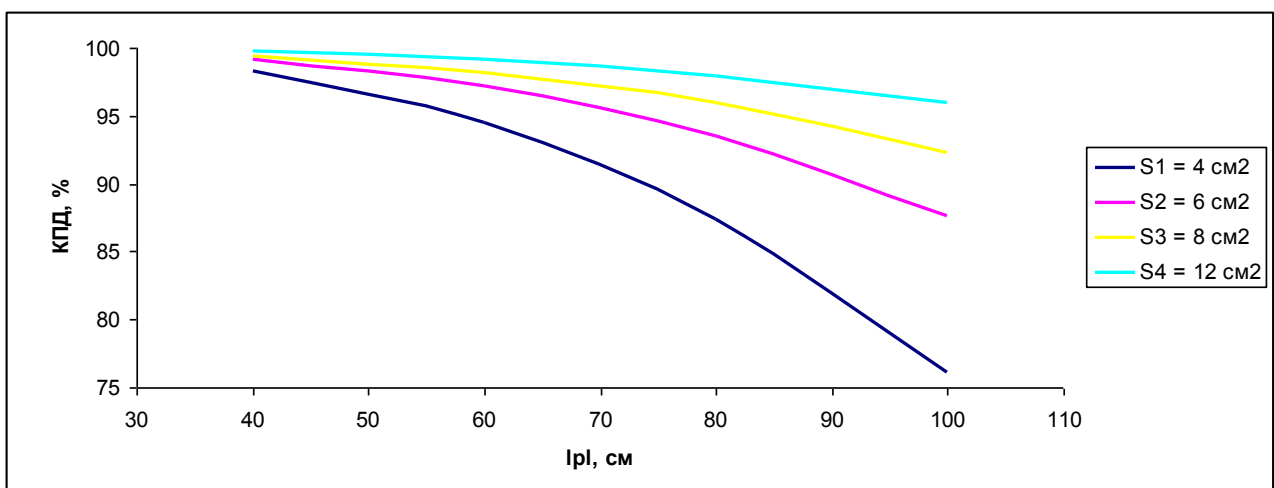
В)



Г)



Д)



е)

Рис. 3-23. Зависимость КПД ВЧ индуктора от длины плазменного пути для различных сечений феррита при $P_{л} = 100\text{Вт}$, $f = 100\text{ кГц}$, а) $D = 1,5\text{см}$ б) $D = 2\text{см}$ в) $D = 3\text{см}$ г) $D = 4\text{см}$ д) $D = 5\text{см}$ е) $D = 8\text{см}$

Влияние длины лампы L «сказывается» на мощность потерь в ВЧ индукторе (и, следовательно, на его КПД) «через» длину плазменного витка l_{pl} .

Мощность потерь в ВЧ индукторе P_{fer} возрастает с увеличением длины плазменного витка l_{pl} быстрее, чем линейно ($P_{fer} \sim l_{pl}^{2,88}$). Увеличение длины плазменного витка l_{pl} ведет к возрастанию ВЧ напряжения на плазменном витке $U_{pl} = E_{pl} * l_{pl}$, что, в свою очередь приводит к росту ВЧ напряжения на индуктивной катушке $U_c = U_{pl} * N$. В результате, увеличивается индукция магнитного поля в магнитопроводе ($B_{fer} \sim U_c$), а вместе с ней и мощность потерь в магнитопроводе, как $P_{fer} \sim B_{fer}^{2,6}$.

На рисунке 3-24 (г) приведены расчетные зависимости l_{pl} от мощности потерь в ВЧ индукторе P_{fer} . Там же представлены экспериментальные данные мощности потерь в ВЧ индуктора P_{fer} , измеренные в индукционных лампах с разрядной трубкой диаметром $D = 4\text{см}$ и двумя магнитопроводами сечением $S_{fer} = 12\text{ см}^2$.

Экспериментальные значения P_{fer} обнаруживают хорошее согласие с рассчитанными значениями P_{fer} для обеих ламп.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование индуктивной люминесцентной лампы, мощностью 100-400 Вт, диаметром 1,5-8см, с длиной плазменного витка 40-120см, замкнутого типа с ферритовыми сердечниками (магнитопроводами), сечением $4-12\text{см}^2$, работающей на частотах 100-400 кГц дали следующие результаты:

-потери мощности в ферритовом сердечнике при относительно небольшой мощности 250 Вт уменьшается с ростом частоты с 19 Вт (100 кГц) до 3 Вт (300 кГц)

-при увеличении частоты резко возрастает КПД ВЧ-индуктора

-увеличение длины лампы трансформаторного типа L приводит к возрастанию мощности потерь в ВЧ индукторе P_{fer} . Полученный результат объясняется в рамках трансформаторной модели индукционного разряда возрастанием мощности потерь в магнитопроводе индуктора P_{fer} с увеличением длины плазменного витка .

-увеличение диаметра разрядной трубки D вызывает снижение мощности потерь в магнитопроводе P_{fer} ; рассчитанные в рамках трансформаторной модели индукционного разряда зависимости P_{fer} от D для ламп с разными длинами L , находится в хорошем согласии с экспериментальными.

- увеличение площади сечения магнитопровода S_{fer} ведет к снижению мощности потерь в магнитопроводе P_{fer} . Рассчитанные для различных диаметров разрядной трубки D зависимости P_{fer} от S_{fer} находятся в хорошем согласии с экспериментальными.

Проведенные расчеты позволяют подобрать оптимальные размеры разрядной трубки (диаметр и длина), сечение сердечника и частоту для заданной мощности лампы, при которых будут минимальные потери мощности в сердечнике и максимальный КПД ВЧ индуктора.

Аннотация.

Проведены расчеты мощности потерь в магнитопроводе P_{fer} ламп трансформаторного типа, работающих на мощностях 100-400 Вт при частоте 100-400кГц. Диапазон диаметров ламп 1,5-8 см, длина плазменного витка 40-120см, сечение ферромагнитного сердечника 4-12 см². Установлено, что P_{fer} возрастает с увеличением длины плазменного витка l_{pl} и уменьшается с увеличением диаметра разрядной трубки D и площади сечения магнитопровода S_{fer} . Экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с результатами расчета, проведенного в рамках трансформаторной модели индукционного разряда.

Abstract

The calculations of power losses in the magnetic circuit Pfer lamps transformer type, operating at the capacity of 100-400 watts at frequency 100-400kHz. The range of diameters of lamps 1.5 to 8 cm, length plasma coil 40-120cm, section ferromagnetic core 4-12 cm². RF coupler power losses P_{fer} were found to grow as the plasma length l_{pl} increased and as the discharge tube diameter D_t and ferrite core cross section S_{fer} decreased. It dependences were found to be in good agreement with the theoretical ones obtained within the framework of the transformer model of an inductive discharge.

Список использованной литературы

1. О.А. Попов. Индукционные источники света//Учебное пособие. Издательский дом МЭИ. Москва. 2010. 64 стр.
2. О.А.Попов. Исследование и разработка индукционных люминесцентных источников света на частотах 100-15000 кГц // Докт. дисс. Москва. 2012. 450 стр.
3. V.A. Godyak. Radio frequency Light Sources Journal: IEEE Industry Applications Magazine –IEEE IND APPL MAG, vol. 8, no. 3, pp. 42-49, 2002
4. John M. Anderson, Scotia, N.Y. Electrodeless gaseous electric discharge devices utilizing ferrite cores. Patent No: 3,500,118 Март 10, 1970 (<http://www.freepatentsonline.com/4017764.html>)
5. О.А.Попов, Р.Т.Чандлер. Индуктивный источник света трансформаторного типа на частотах 150-400 кГц мощностью 200-500 Вт. Теплофизика высоких температур, 2007, т.45, # 5, 795-800.
6. Г.Н. Рохлин. Разрядные источники света, Москва, 1991. 720 стр.
7. О.А. Попов. Patent No: US 6,522,085 В2. Февраль 18, 2003
8. V.A. Godyak. Patent No: US 5,834,905 Ноябрь 10,1998
9. О.А. Попов, А.Е. Атаев. Мощность потерь в ВЧ индукторе лампы трансформаторного типа и ее зависимость от размеров трубки и магнитопровода, Вестник МЭИ (принято к публикации)
10. Т.Ю. Толстова. Бакалаврская работа. Расчет потерь мощности в магнитопроводе лампы трансформаторного типа. 2012

Приложение

Полные потери в ферритовом магнитопроводе

Таблица 1.

Потери в ферритовом магнитопроводе при $D=1,5\text{см}$

Длина l_p , см	Частота f , кГц	$S_{\text{фер}}$, см ²	$P_{\text{фер}}$, Вт					
			P1=100Вт	P2=150Вт	P3=250Вт	P4=300Вт	P5=400Вт	
40	100	4	6,7	5,3	3,9	3,5	2,8	
		6	3,4	2,7	2	1,8	1,5	
		8	2,2	1,7	1,3	1,1	0,9	
		12	1,1	0,9	0,7	0,6	0,5	
	200	4	3,3	2,6	1,9	1,8	1,5	
		6	1,7	1,4	1	0,9	0,8	
		8	1,1	0,9	0,6	0,5	0,4	
		12	0,6	0,4	0,3	0,29	0,25	
	300	4	2,2	1,8	1,3	1,2	1	
		6	1,1	0,9	0,7	0,6	0,5	
		8	0,7	0,6	0,4	0,32	0,3	
		12	0,4	0,29	0,22	0,19	0,17	
	400	4	1,7	1,3	0,9	0,8	0,7	
		6	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4	
		8	0,5	0,4	0,3	0,28	0,24	
		12	0,28	0,22	0,16	0,15	0,12	
	60	100	4	21,4	16,9	12,6	11,3	9,6
			6	11,1	8,7	6,5	5,9	4,9
			8	6,9	5,5	4,1	3,7	3,1
			12	3,6	2,8	2,1	1,9	1,6
200		4	10,7	8,5	6,3	5,7	4,8	
		6	5,5	4,4	3,3	2,9	2,5	
		8	3,5	2,7	2	1,8	1,5	
		12	1,8	1,4	1,1	0,9	0,8	
300		4	7,1	5,6	4,2	3,8	3,2	
		6	3,7	2,9	2,2	1,9	1,7	
		8	2,3	1,8	1,4	1,2	1	
		12	1,2	0,9	0,7	0,6	0,5	
400		4	5,4	4,2	3,1	2,8	2,4	
		6	2,8	2,2	1,6	1,5	1,2	
		8	1,7	1,4	1	0,9	0,8	
		12	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4	
80	100	4	49,1	38,8	28,8	25,9	21,6	
		6	25,3	20	14,9	13,4	11,3	
		8	15,9	12,5	9,3	8,4	7,1	
		12	8,2	6,5	4,8	4,3	3,7	
	200	4	24,5	19,4	14,4	12,9	10,9	
		6	12,7	10	7,4	6,7	5,7	

		8	7,9	6,3	4,7	4,2	3,5	
		12	4,1	3,2	2,4	2,2	1,8	
	300	4	16,4	12,9	9,6	8,6	7,3	
		6	8,4	6,7	4,9	4,5	3,8	
		8	5,3	4,2	3,1	2,8	2,4	
		12	2,7	2,2	1,6	1,4	1,2	
	400	4	12,3	9,7	7,2	6,5	5,5	
		6	6,3	5	3,7	3,3	2,8	
		8	3,9	3,1	2,3	2,1	1,8	
		12	2	1,6	1,2	1,1	0,9	
	100	100	4	83,3	73,7	54,8	49,3	41,7
			6	48,2	38	28,3	25,5	21,6
8			30,1	23,8	17,7	15,9	13,5	
12			15,6	12,3	9,1	8,2	6,9	
200		4	46,6	36,9	27,4	24,7	20,9	
		6	24,1	19	14,2	12,7	10,8	
		8	15,1	11,9	8,9	7,9	6,7	
		12	7,8	6,2	4,6	4,1	3,5	
300		4	31,1	24,6	18,3	16,4	13,9	
		6	16,1	12,7	9,4	8,5	7,2	
		8	10	7,9	5,9	5,3	4,5	
		12	5,2	4,1	3	2,7	2,3	
400		4	23,3	18,4	13,7	12,3	10,4	
		6	12	9,5	7,1	6,4	5,4	
		8	7,5	5,9	4,4	3,9	3,4	
		12	3,9	3,1	2,3	2,1	1,7	
120		100	4	97,7	87,4	82,9	73,9	60,5
			6	71,4	64,4	47,8	43,1	36,4
			8	50,9	40,3	29,9	26,9	22,8
			12	26,3	20,8	15,5	13,9	11,8
	200	4	78,8	62,3	46,3	41,7	35,3	
		6	40,7	32,2	23,9	21,5	18,2	
		8	25,5	20,1	14,9	13,5	11,4	
		12	13,2	10,4	7,7	6,9	5,9	
	300	4	52,6	41,6	30,9	27,8	23,5	
		6	27,1	21,5	15,9	14,4	12,1	
		8	16,9	13,4	9,9	8,9	7,6	
		12	8,8	6,9	5,2	4,6	3,9	
	400	4	39,4	31,2	23,2	20,8	17,6	
		6	20,4	16,1	11,9	10,8	9,1	
		8	12,7	10,1	7,5	6,7	5,7	
		12	6,6	5,2	3,9	3,5	2,9	

Потери в ферритовом магнитопроводе при D=2см

Длина l _{pl} , см	Частота f, кГц	S _{fer} , см ²	P _{fer} , Вт				
			P1=100Вт	P2=150Вт	P3=250Вт	P4=300Вт	P5=400Вт

40	100	4	5	3,9	2,9	2,7	2,3
		6	2,6	2,1	1,5	1,4	1,2
		8	1,6	1,3	0,9	0,8	0,7
		12	0,8	0,7	0,5	0,4	0,38
	200	4	2,5	1,9	1,5	1,3	1,1
		6	1,3	1	0,8	0,7	0,6
		8	0,8	0,6	0,5	0,4	0,36
		12	0,4	0,33	0,25	0,22	0,19
	300	4	1,7	1,3	0,9	0,8	0,7
		6	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4
		8	0,5	0,4	0,3	0,28	0,24
		12	0,28	0,22	0,17	0,15	0,13
	400	4	1,3	1	0,7	0,6	0,5
		6	0,7	0,5	0,4	0,34	0,29
		8	0,4	0,32	0,24	0,22	0,18
		12	0,21	0,17	0,12	0,11	0,1
60	100	4	16,2	12,8	9,5	8,6	7,2
		6	8,4	6,6	4,9	4,4	3,7
		8	5,2	4,1	3,1	2,8	2,3
		12	2,7	2,1	1,6	1,4	1,2
	200	4	8,1	6,4	4,8	4,3	3,6
		6	4,2	3,3	2,5	2,2	1,9
		8	2,6	2,1	1,5	1,4	1,2
		12	1,4	1,1	0,8	0,7	0,6
	300	4	5,4	4,3	3,2	2,9	2,4
		6	2,8	2,2	1,6	1,5	1,2
		8	1,7	1,4	1	0,9	0,8
		12	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4
	400	4	4	3,2	2,4	2,1	1,8
		6	2,1	1,7	1,2	1,1	0,9
		8	1,3	1	0,8	0,7	0,6
		12	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
80	100	4	37,1	29,3	21,8	19,6	16,6
		6	19,1	15,1	11,3	10,1	8,6
		8	11,9	9,5	7	6,3	5,4
		12	6,2	4,9	3,6	3,3	2,8
	200	4	18,5	14,6	10,9	9,4	8,3
		6	9,6	7,6	5,6	5,1	4,3
		8	5,9	4,7	3,5	3,2	2,7
		12	3,1	2,4	1,8	1,6	1,4
	300	4	12,4	9,8	7,3	6,5	5,5
		6	6,4	5	3,7	3,4	2,9
		8	3,9	3,2	2,3	2,1	1,8
		12	2,1	1,6	1,2	1,1	0,9
	400	4	9,3	7,3	5,4	4,9	4,1
		6	4,8	3,8	2,8	2,5	2,1
		8	2,9	2,4	1,8	1,6	1,3
		12	1,5	1,2	0,9	0,8	0,7
100	100	4	70,5	55,7	41,4	37,3	31,5

		6	36,4	28,8	21,4	19,2	16,3
		8	22,8	18	13,4	12	10,1
		12	11,8	9,3	6,9	6,2	5,3
	200	4	35,2	27,8	20,7	18,6	15,8
		6	18,2	14,4	10,7	9,6	8,1
		8	11,4	9	6,7	6	5,1
		12	5,9	4,6	3,5	3,1	2,6
	300	4	23,5	18,6	13,8	12,4	10,5
		6	12,1	9,6	7,1	6,4	5,4
		8	7,6	6	4,5	4	3,4
		12	3,9	3,1	2,3	2,1	1,7
	400	4	17,6	13,9	10,4	9,3	7,9
6		9,1	7,2	5,3	4,8	4,1	
8		5,7	4,5	3,3	3	2,5	
12		2,9	2,3	1,7	1,6	1,3	
120	100	4	89,1	84,2	70	62,9	53,3
		6	61,5	48,6	36,2	32,5	27,5
		8	38,5	30,4	22,6	20,3	17,2
		12	19,8	15,7	11,7	10,5	8,9
	200	4	59,6	47,1	35	31,5	26,7
		6	30,8	24,3	18,1	16,3	13,8
		8	19,2	15,2	11,3	10,2	8,6
		12	9,9	7,9	5,8	5,3	4,4
	300	4	39,7	31,4	23,3	20,9	17,8
		6	20,5	16,2	12,1	10,8	9,2
		8	12,8	10,1	7,5	6,8	5,7
		12	6,6	5,2	3,9	3,5	2,9
400	4	29,8	23,5	17,5	15,7	13,3	
	6	15,4	12,2	9	8,1	6,9	
	8	9,6	7,6	5,7	5,1	4,3	
	12	4,9	3,9	2,9	2,6	2,2	

Потери в ферритовом магнитопроводе при D=3см

Длина lр, см	Частота f, кГц	Sfer, см ²	Pfer, Вт				
			P1=100Вт	P2=150Вт	P3=250Вт	P4=300Вт	P5=400Вт
40	100	4	3,5	2,8	2,1	1,9	1,6
		6	1,8	1,4	1,1	0,9	0,8
		8	1,1	0,9	0,7	0,6	0,5
		12	0,6	0,5	0,4	0,3	0,26
	200	4	1,8	1,4	1	0,9	0,8
		6	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4
		8	0,6	0,4	0,33	0,3	0,25
		12	0,29	0,23	0,17	0,16	0,13
	300	4	1,2	0,9	0,7	0,6	0,5
		6	0,6	0,5	0,4	0,32	0,27
		8	0,4	0,3	0,22	0,2	0,17
		12	0,19	0,15	0,12	0,1	0,09

		4	0,9	0,7	0,5	0,43	0,39
		6	0,5	0,36	0,27	0,24	0,2
		8	0,28	0,22	0,17	0,15	0,13
	400	12	0,15	0,12	0,09	0,08	0,07
60	100	4	11,3	8,9	6,6	5,9	5
		6	5,8	4,6	3,4	3,1	2,6
		8	3,6	2,9	2,1	1,9	1,6
		12	1,9	1,5	1,1	1	0,8
	200	4	5,6	4,5	3,3	2,9	2,5
		6	2,9	2,3	1,7	1,5	1,3
		8	1,8	1,4	1,1	0,9	0,8
		12	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4
	300	4	3,8	2,9	2,2	1,9	1,7
		6	1,9	1,5	1,1	1	0,9
		8	1,2	0,9	0,7	0,6	0,5
		12	0,6	0,5	0,37	0,33	0,28
	400	4	2,8	2,2	1,7	1,5	1,3
		6	1,5	1,2	0,9	0,8	0,7
		8	0,9	0,7	0,5	0,4	0,3
		12	0,5	0,4	0,28	0,25	0,21
80	100	4	25,8	20,4	15,2	13,7	11,6
		6	13,3	10,5	7,8	7,1	5,7
		8	8,3	6,6	4,9	4,4	3,7
		12	4,3	3,4	2,5	2,3	1,9
	200	4	12,9	10,4	7,6	6,8	5,8
		6	6,7	5,3	3,9	3,5	2,9
		8	4,2	3,3	2,5	2,2	1,9
		12	2,2	1,7	1,3	1,1	0,9
	300	4	8,6	6,8	5,1	4,6	3,9
		6	4,4	3,5	2,6	2,4	1,9
		8	2,8	2,2	1,6	1,5	1,2
		12	1,4	1,1	0,8	0,7	0,6
	400	4	6,5	5,1	3,8	3,4	2,9
		6	3,3	2,6	1,9	1,8	1,5
		8	2,1	1,6	1,2	1,1	0,9
		12	1,1	0,9	0,7	0,6	0,5
100	100	4	49,1	38,8	28,9	25,9	21,9
		6	25,4	20	14,9	13,4	11,4
		8	15,9	12,5	9,3	8,4	7,1
		12	8,2	6,5	4,8	4,3	3,7
	200	4	24,6	19,4	14,4	12,9	10,9
		6	12,7	10	7,5	6,7	5,7
		8	7,9	6,3	4,7	4,2	3,6
		12	4,1	3,2	2,4	2,2	1,8
	300	4	16,4	12,9	9,6	8,7	7,3
		6	8,5	6,7	4,9	4,5	3,8
		8	5,3	4,2	3,1	2,8	2,4
		12	2,7	2,2	1,6	1,4	1,2

120	400	4	12,3	9,7	7,2	6,5	5,6
		6	6,3	5	3,7	3,4	2,8
		8	3,9	3,1	2,3	2,1	1,8
		12	2	1,6	1,2	1,1	0,9
	100	4	83	65,6	48,8	43,9	37,2
		6	42,9	33,9	25,2	22,7	19,2
		8	26,8	21,2	15,8	14,2	12
		12	13,9	10,9	8,1	7,3	6,2
	200	4	41,5	32,8	24,4	21,9	18,6
		6	21,4	16,9	12,6	11,3	9,6
		8	13,4	10,6	7,9	7,1	6
		12	6,9	5,5	4,1	3,7	3,1
	300	4	27,7	21,9	16,3	14,6	12,4
		6	14,3	11,3	8,4	7,6	6,4
		8	8,9	7,1	5,3	4,7	4
		12	4,6	3,7	2,7	2,4	2,1
400	4	20,8	16,4	12,2	10,9	9,3	
	6	10,7	8,5	6,3	5,7	4,8	
	8	6,7	5,3	3,9	3,5	3	
	12	3,5	2,7	2	1,8	1,6	

Потери в ферритовом магнитопроводе при D=4см

Длина lрl, см	Частота f, кГц	Sfer, см ²	Pfer, Вт				
			P1=100Вт	P2=150Вт	P3=250Вт	P4=300Вт	P5=400Вт
40	100	4	2,8	2,2	1,6	1,5	1,2
		6	1,4	1,1	0,9	0,8	0,6
		8	0,9	0,7	0,5	0,4	0,3
		12	0,5	0,4	0,27	0,25	0,2
	200	4	1,4	1,1	0,8	0,7	0,6
		6	0,7	0,6	0,5	0,4	0,32
		8	0,5	0,4	0,26	0,24	0,2
		12	0,23	0,18	0,14	0,12	0,1
	300	4	0,9	0,7	0,5	0,48	0,4
		6	0,5	0,4	0,28	0,25	0,21
		8	0,3	0,24	0,18	0,16	0,13
		12	0,16	0,12	0,09	0,08	0,07
	400	4	0,7	0,6	0,4	0,36	0,3
		6	0,4	0,28	0,21	0,19	0,16
		8	0,23	0,18	0,13	0,12	0,1
		12	0,12	0,09	0,07	0,06	0,05
60	100	4	8,9	7,1	5,3	4,7	4
		6	4,6	3,7	2,7	2,4	2,1
		8	2,9	2,3	1,7	1,5	1,3
		12	1,5	1,2	0,9	0,8	0,7
	200	4	4,5	3,5	2,6	2,4	2
		6	2,3	1,8	1,4	1,2	1

		8	1,4	1,1	0,8	0,7	0,6
		12	0,7	0,6	0,43	0,39	0,33
	300	4	3	2,4	1,8	1,6	1,3
		6	1,5	1,2	0,9	0,8	0,7
		8	1	0,8	0,6	0,5	0,4
		12	0,5	0,4	0,29	0,26	0,22
	400	4	2,2	1,8	1,3	1,2	1
		6	1,2	0,9	0,7	0,6	0,5
		8	0,7	0,6	0,4	0,38	0,32
		12	0,37	0,3	0,22	0,2	0,17
80	100	4	20,5	16,2	12	10,8	9,2
		6	10,6	8,4	6,2	5,6	4,7
		8	6,6	5,2	3,9	3,5	2,9
		12	3,4	2,7	2	1,8	1,5
	200	4	10,2	8,1	6	5,4	4,6
		6	5,3	4,2	3,1	2,8	2,4
		8	3,3	2,6	1,9	1,8	1,5
		12	1,7	1,4	1	0,9	0,8
	300	4	6,8	5,4	4	3,6	3,1
		6	3,5	2,8	2,1	1,9	1,6
		8	2,2	1,7	1,3	1,2	1
		12	1,1	0,9	0,7	0,6	0,5
	400	4	5,1	4	3	2,7	2,3
		6	2,6	2,1	1,6	1,4	1,2
		8	1,7	1,3	1	0,9	0,7
		12	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4
100	100	4	38,9	30,8	22,9	20,6	17,4
		6	20,1	15,9	11,8	10,6	9
		8	12,6	9,9	7,4	6,7	5,6
		12	6,5	5,1	3,8	3,4	2,9
	200	4	19,5	15,4	11,4	10,3	8,7
		6	10,1	7,9	5,9	5,3	4,5
		8	6,3	4,9	3,7	3,3	2,8
		12	3,2	2,6	1,9	1,7	1,5
	300	4	12,9	10,3	7,6	6,9	5,8
		6	6,7	5,3	3,9	3,5	3
		8	4,2	3,3	2,5	2,2	1,9
		12	2,2	1,7	1,3	1,1	0,9
400	4	9,7	7,7	5,7	5,1	4,4	
	6	5	3,9	2,9	2,7	2,3	
	8	3,1	2,5	1,8	1,7	1,4	
	12	1,6	1,3	1	0,9	0,7	
120	100	4	65,8	52,1	38,7	34,8	29,5
		6	34	26,9	19,9	17,9	15,2
		8	21,3	16,8	12,5	11,3	9,5
		12	10,9	8,7	6,5	5,8	4,9
	200	4	32,9	26	19,4	17,4	14,7
		6	17	13,4	10	9	7,6
		8	10,6	8,4	6,3	5,6	4,8

		12	5,5	4,3	3,2	2,9	2,5
	300	4	21,9	17,4	12,9	11,6	9,8
		6	11,3	8,9	6,7	6	5,1
		8	7,1	5,6	4,2	3,8	3,2
		12	3,7	2,9	2,2	1,9	1,6
	400	4	16,5	13	9,7	8,7	7,4
		6	8,5	6,7	5	4,5	3,8
		8	5,3	4,2	3,1	2,8	2,4
		12	2,7	2,2	1,6	1,5	1,2

Потери в ферритовом магнитопроводе при D=5см

Длина lрl, см	Частота f, кГц	Sfer, см ²	Pfer, Вт					
			P1=100Вт	P2=150Вт	P3=250Вт	P4=300Вт	P5=400Вт	
40	100	4	2,4	1,9	1,4	1,2	1,1	
		6	1,2	0,9	0,7	0,6	0,5	
		8	0,8	0,6	0,4	0,34	0,3	
		12	0,4	0,31	0,23	0,2	0,18	
	200	4	1,2	1	0,7	0,6	0,5	
		6	0,6	0,5	0,4	0,32	0,27	
		8	0,4	0,3	0,22	0,2	0,17	
		12	0,2	0,16	0,12	0,1	0,09	
	300	4	0,8	0,6	0,5	0,4	0,35	
		6	0,4	0,3	0,24	0,21	0,18	
		8	0,25	0,2	0,15	0,13	0,11	
		12	0,13	0,1	0,08	0,07	0,06	
	400	4	0,6	0,5	0,34	0,3	0,26	
		6	0,3	0,24	0,18	0,16	0,14	
		8	0,19	0,15	0,11	0,1	0,09	
		12	0,09	0,08	0,06	0,05	0,04	
	60	100	4	7,6	5,9	4,4	4	3,4
			6	3,9	3,1	2,3	2,1	1,7
			8	2,4	1,9	1,4	1,3	1,1
			12	1,3	1	0,8	0,7	0,6
200		4	3,8	3	2,2	2	1,7	
		6	2	1,5	1,1	1	0,9	
		8	1,2	0,9	0,7	0,6	0,5	
		12	0,6	0,5	0,37	0,33	0,28	
300		4	2,5	2	1,5	1,3	1,1	
		6	1,3	1	0,8	0,7	0,6	
		8	0,8	0,6	0,5	0,4	0,37	
		12	0,4	0,3	0,25	0,22	0,19	
400		4	1,9	1,5	1,1	1	0,8	
		6	1	0,8	0,6	0,5	0,4	
		8	0,6	0,5	0,36	0,32	0,27	
		12	0,3	0,25	0,19	0,17	0,14	
80	100	4	17,3	13,7	10,2	9,2	7,8	
		6	8,9	7,1	5,3	4,7	4	

		8	5,6	4,4	3,3	2,9	2,5
		12	2,9	2,3	1,7	1,5	1,3
	200	4	8,7	6,8	5,1	4,6	3,9
		6	4,5	3,5	2,6	2,4	2
		8	2,8	2,2	1,6	1,5	1,3
		12	1,4	1,1	0,9	0,8	0,6
	300	4	5,8	4,6	3,4	3,1	2,6
		6	2,9	2,4	1,8	1,6	1,3
		8	1,9	1,5	1,1	1	0,8
		12	0,9	0,8	0,6	0,5	0,4
	400	4	4,3	3,4	2,5	2,3	1,9
		6	2,2	1,8	1,3	1,2	1
		8	1,4	1,1	0,8	0,7	0,6
		12	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
100	100	4	32,9	26	19,4	17,4	14,7
		6	17	13,5	10	8,9	7,6
		8	10,6	8,4	6,3	5,6	4,8
		12	5,5	4,3	3,2	2,9	2,5
	200	4	16,5	13	9,7	8,7	7,4
		6	8,5	6,7	5	4,5	3,8
		8	5,3	4,2	3,1	2,8	2,4
		12	2,7	2,2	1,6	1,5	1,2
	300	4	10,9	8,7	6,5	5,8	4,9
		6	5,7	4,5	3,3	2,9	2,5
		8	3,5	2,8	2,1	1,9	1,6
		12	1,8	1,4	1,1	0,9	0,8
	400	4	8,2	6,5	4,8	4,4	3,7
		6	4,3	3,4	2,5	2,3	1,9
		8	2,7	2,1	1,6	1,4	1,2
		12	1,4	1,1	0,8	0,7	0,6
120	100	4	55,7	44	32,7	29,5	24,9
		6	28,8	22,7	16,9	15,2	12,9
		8	18	14,2	10,6	9,5	8,1
		12	9,3	7,3	5,5	4,9	4,2
	200	4	27,9	22	16,4	14,8	12,5
		6	14,4	11,4	8,5	7,6	6,4
		8	9	7,1	5,3	4,8	4
		12	4,6	3,7	2,7	2,5	2,1
	300	4	18,6	14,7	10,9	9,8	8,3
		6	9,6	7,6	5,6	5,1	4,3
		8	6	4,7	3,5	3,2	2,7
		12	3,1	2,4	1,8	1,6	1,4
	400	4	13,9	11	8,2	7,4	6,2
		6	7,2	5,7	4,2	3,8	3,2
		8	4,5	3,6	2,6	2,4	2
		12	2,3	1,8	1,4	1,2	1

Потери в ферритовом магнитопроводе при D=8см

Длина l _{pl} , см	Частота f, кГц	S _{фер} , см ²	P _{фер} , Вт					
			P1=100Вт	P2=150Вт	P3=250Вт	P4=300Вт	P5=400Вт	
40	100	4	1,7	1,4	1	0,9	0,8	
		6	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4	
		8	0,6	0,4	0,3	0,29	0,25	
		12	0,29	0,23	0,17	0,15	0,13	
	200	4	0,9	0,7	0,5	0,4	0,38	
		6	0,5	0,4	0,26	0,23	0,2	
		8	0,28	0,22	0,16	0,15	0,12	
		12	0,14	0,11	0,09	0,08	0,06	
	300	4	0,6	0,5	0,34	0,3	0,26	
		6	0,3	0,23	0,17	0,16	0,13	
		8	0,18	0,15	0,1	0,09	0,08	
		12	0,1	0,08	0,06	0,05	0,04	
	400	4	0,4	0,34	0,25	0,23	0,19	
		6	0,22	0,17	0,13	0,12	0,1	
		8	0,14	0,1	0,08	0,07	0,06	
		12	0,07	0,06	0,04	0,04	0,03	
	60	100	4	5,5	4,3	3,2	2,9	2,5
			6	2,8	2,2	1,7	1,5	1,3
			8	1,8	1,4	1	0,9	0,8
			12	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4
200		4	2,7	2,2	1,6	1,5	1,2	
		6	1,4	1,1	0,9	0,8	0,6	
		8	0,9	0,7	0,5	0,4	0,3	
		12	0,5	0,4	0,27	0,24	0,21	
300		4	1,8	1,4	1,1	0,9	0,8	
		6	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4	
		8	0,6	0,5	0,35	0,31	0,27	
		12	0,3	0,24	0,18	0,16	0,14	
400		4	1,4	1,1	0,8	0,7	0,6	
		6	0,7	0,6	0,5	0,4	0,32	
		8	0,4	0,35	0,26	0,24	0,19	
		12	0,23	0,18	0,14	0,12	0,1	
80		100	4	12,6	9,9	7,4	6,7	5,6
			6	6,5	5,1	3,8	3,4	2,9
			8	4,1	3,2	2,4	2,2	1,8
			12	2,1	1,7	1,2	1,1	0,9
	200	4	6,3	4,9	3,7	3,3	2,8	
		6	3,2	2,6	1,9	1,7	1,5	
		8	2	1,6	1,2	1,1	0,9	
		12	1,1	0,8	0,7	0,6	0,5	
	300	4	4,2	3,3	2,5	2,2	1,9	
		6	2,2	1,7	1,3	1,1	0,9	
		8	1,4	1,1	0,8	0,7	0,6	
		12	0,7	0,6	0,4	0,37	0,31	
	400	4	3,1	2,5	1,8	1,7	1,4	

		6	1,6	1,3	1	0,9	0,7
		8	1	0,8	0,6	0,5	0,4
		12	0,5	0,4	0,31	0,28	0,24
100	100	4	23,9	18,9	14,1	12,7	10,7
		6	12,4	9,8	7,3	6,5	5,5
		8	7,7	6,1	4,5	4,1	3,5
		12	4	3,2	2,3	2,1	1,8
	200	4	11,9	9,5	7	6,3	5,4
		6	6,2	4,9	3,6	3,3	2,8
		8	3,9	3,1	2,3	2	1,7
		12	2	1,6	1,2	1,1	0,9
	300	4	7,9	6,3	4,7	4,2	3,6
		6	4,1	3,3	2,4	2,2	1,8
		8	2,6	2	1,5	1,4	1,2
		12	1,3	1,1	0,8	0,7	0,6
	400	4	5,9	4,7	3,5	3,2	2,7
		6	3,1	2,4	1,8	1,6	1,4
		8	1,9	1,5	1,1	1	0,9
		12	1	0,8	0,6	0,5	0,4
120	100	4	40,5	31,9	23,8	21,4	18,1
		6	20,9	16,5	12,3	11	9,3
		8	13,1	10,3	7,7	6,9	5,8
		12	6,7	5,3	3,9	3,6	3
	200	4	20,2	15,9	11,9	10,7	9,1
		6	10,4	8,3	6,1	5,5	4,7
		8	6,5	5,2	3,8	3,5	2,9
		12	3,4	2,7	1,9	1,8	1,5
	300	4	13,5	10,7	7,9	7,1	6
		6	6,9	5,5	4,1	3,7	3,1
		8	4,4	3,4	2,6	2,3	1,9
		12	2,3	1,8	1,3	1,2	1
	400	4	10,1	8	5,9	5,3	4,5
		6	5,2	4,1	3,1	2,8	2,3
		8	3,3	2,6	1,9	1,7	1,5
		12	1,7	1,3	1	0,9	0,8

Таблица3

КПД ВЧ индуктора при D=1,5см

Длина lрl, см	Частота f, кГц	Sфер, см ²	КПД, %				
			P1=100Вт	P2=150Вт	P3=250Вт	P4=300Вт	P5=400Вт
40	100	4	93,3	96,5	98,2	98,8	99,3
		6	96,6	98,2	99,2	99,4	99,6
		8	97,8	98,9	99,5	99,6	99,78
		12	98,9	99,4	99,72	99,8	99,88
	200	4	96,7	98,3	99,2	99,4	99,6
		6	98,3	99,1	99,6	99,7	99,8
		8	98,9	99,4	99,76	99,83	99,9

		12	99,4	99,73	99,88	99,9	99,94
	300	4	97,8	98,8	99,5	99,6	99,75
		6	98,9	99,4	99,72	99,8	99,88
		8	99,3	99,6	99,84	99,89	99,93
		12	99,6	99,8	99,91	99,94	99,96
	400	4	98,3	99,1	99,6	99,7	99,83
		6	99,1	99,5	99,76	99,83	99,9
		8	99,5	99,73	99,88	99,9	99,94
		12	99,72	99,85	99,94	99,95	99,97
60	100	4	78,6	88,7	94,9	96,2	97,6
		6	88,9	94,2	97,4	98	98,8
		8	93,1	96,3	98,4	98,8	99,2
		12	96,4	98,1	99,2	99,4	99,6
	200	4	89,3	94,3	97,5	98,1	98,8
		6	94,5	97,1	98,7	99	99,4
		8	96,5	98,2	99,2	99,4	99,6
		12	98,2	99,1	99,6	99,7	99,8
	300	4	92,9	96,3	98,3	98,7	99,2
		6	96,3	98,1	99,1	99,4	99,6
		8	97,7	98,8	99,4	99,6	99,75
		12	98,8	99,4	99,7	99,8	99,88
400	4	94,6	97,2	98,8	99,1	99,4	
	6	97,2	98,5	99,4	99,5	99,7	
	8	98,3	99,1	99,6	99,7	99,8	
	12	99,1	99,5	99,8	99,83	99,9	
80	100	4	50,9	74,1	88,5	91,4	94,6
		6	74,7	86,7	94	95,5	97,2
		8	84,1	96,7	96,3	97,2	98,2
		12	91,8	95,7	98,1	98,6	99,1
	200	4	75,5	87,1	94,2	95,7	97,3
		6	87,3	93,3	97	97,8	98,6
		8	92,1	95,8	98,1	98,6	99,1
		12	95,9	97,9	99	99,3	99,6
	300	4	83,6	91,4	96,2	97,1	98,2
		6	91,6	95,5	98	98,5	99,1
		8	94,7	97,2	98,8	99,1	99,4
		12	97,3	98,5	99,4	99,5	99,7
400	4	87,7	93,5	97,1	97,8	98,6	
	6	93,7	96,7	98,5	98,9	99,3	
	8	96,1	97,9	99,1	99,3	99,6	
	12	98	98,9	99,5	99,6	99,78	
100	100	4	16,7	50,9	78,1	83,6	89,6
		6	51,8	74,7	88,7	91,5	94,6
		8	69,9	84,1	92,9	94,7	96,6
		12	84,4	91,8	96,4	97,3	98,3
	200	4	53,4	75,4	89	91,8	94,8
		6	75,9	87,3	94,3	95,8	97,3
		8	84,9	92,1	96,4	97,4	98,3

		12	92,2	95,9	98,2	98,6	99,1
	300	4	68,9	83,6	92,7	94,5	96,5
		6	83,9	91,5	96,2	97,2	98,2
		8	90	94,7	97,6	98,2	98,9
		12	94,8	97,3	98,8	99,1	99,4
	400	4	76,7	87,7	94,5	95,9	97,4
		6	88	93,7	97,2	97,9	98,7
		8	92,5	96,1	98,2	98,7	99,2
		12	96,1	97,9	99,1	99,3	99,6
120	100	4	2,3	41,7	66,8	75,4	84,9
		6	28,6	57,1	80,9	85,6	90,9
		8	49,1	73,1	88	91	94,3
		12	73,3	86,1	93,8	95,4	97,1
	200	4	21,2	58,5	81,5	86,1	91,2
		6	59,3	78,5	90,4	92,8	95,5
		8	74,5	86,6	94	95,5	97,2
		12	86,8	93,1	96,9	97,7	98,5
	300	4	47,4	72,3	87,6	90,7	94,1
		6	72,9	85,7	93,6	95,2	96,9
		8	83,1	91,1	96	97	98,1
		12	91,2	95,4	97,9	98,5	99
	400	4	60,6	79,2	90,7	93,1	95,6
		6	79,6	89,3	95,2	96,4	97,7
		8	87,3	93,3	97	97,8	98,6
		12	93,4	96,5	98,4	98,8	99,3

КПД ВЧ индуктора при D=2см

Длина l _р , см	Частота f, кГц	S _{фер} , см ²	КПД, %					
			P1=100Вт	P2=150Вт	P3=250Вт	P4=300Вт	P5=400Вт	
40	100	4	95	97,4	98,8	99,1	99,4	
		6	97,4	98,5	99,4	99,5	99,7	
		8	98,4	99,1	99,6	99,7	99,83	
		12	99,2	99,5	99,8	99,87	99,91	
	200	4	97,5	98,7	99,4	99,6	99,73	
		6	98,7	99,3	99,7	99,77	99,85	
		8	99,2	99,6	99,8	99,87	99,91	
		12	99,6	99,78	99,9	99,93	99,95	
	300	4	98,3	99,1	99,6	99,7	99,83	
		6	99,1	99,5	99,76	99,83	99,9	
		8	99,5	99,73	99,88	99,91	99,94	
		12	99,72	99,85	99,94	99,95	99,97	
	400	4	98,7	99,3	99,72	99,8	99,88	
		6	99,3	99,7	99,84	99,83	99,93	
		8	99,6	99,79	99,9	99,93	99,96	
		12	99,79	99,89	99,95	99,96	99,98	
	60	100	4	83,8	91,5	96,2	97,1	98,2
			6	91,6	95,6	98	98,5	99,1

		8	94,8	97,3	98,8	99,1	99,4
		12	97,3	98,5	99,4	99,5	99,7
	200	4	91,9	95,7	98,1	98,6	99,1
		6	95,8	97,8	99	99,3	99,5
		8	97,4	98,5	99,4	99,5	99,7
		12	98,6	99,3	99,7	99,8	99,85
	300	4	94,6	97,1	98,7	99	99,4
		6	97,2	98,5	99,4	99,5	99,7
		8	98,3	99,1	99,6	99,7	99,8
		12	99,1	99,5	99,76	99,83	99,9
	400	4	96	97,9	99	99,3	99,6
		6	97,9	98,9	99,5	99,6	99,78
		8	98,7	99,3	99,7	99,8	99,85
		12	99,3	99,6	99,8	99,87	99,93
80	100	4	62,9	80,5	91,3	93,5	95,9
		6	80,9	89,9	95,5	96,6	97,9
		8	88,1	93,7	97,2	97,9	98,7
		12	93,8	96,7	98,6	98,9	99,3
	200	4	81,5	90,3	95,6	96,9	97,9
		6	90,4	94,9	97,8	98,3	98,9
		8	94,1	96,9	98,6	98,9	99,3
		12	96,9	98,5	99,3	99,5	99,7
	300	4	87,6	93,5	97,1	97,8	98,6
		6	93,6	96,7	98,5	98,9	99,3
		8	96,1	97,9	99,1	99,3	99,6
		12	97,9	98,9	99,5	99,6	99,8
	400	4	90,7	95,1	97,8	98,4	98,9
		6	95,2	97,5	98,9	99,2	99,5
		8	97,1	98,5	99,3	99,5	99,7
		12	98,5	99,2	99,6	99,7	99,8
100	100	4	29,5	62,9	83,4	87,6	92,1
		6	63,6	80,8	91,4	93,6	95,9
		8	77,2	88	94,6	96	97,5
		12	88,2	93,8	97,24	97,9	98,7
	200	4	64,8	81,5	91,7	93,8	96,1
		6	81,8	90,4	95,7	96,8	97,9
		8	88,6	94	97,3	98	98,7
		12	94,1	96,9	98,6	98,9	99,4
	300	4	76,5	87,6	94,5	95,9	97,4
		6	87,9	93,6	97,2	97,9	98,7
		8	92,4	96	98,2	98,7	99,2
		12	96,1	97,9	99,1	99,3	99,6
	400	4	82,4	90,7	95,8	96,9	98
		6	90,9	95,2	97,9	98,4	98,9
		8	94,3	97	98,7	99	99,4
		12	97,1	98,5	99,3	99,5	99,7
120	100	4	10,9	43,9	72	79	86,7
		6	38,5	67,6	85,5	89,2	93,1
		8	61,5	79,7	90,9	93,2	95,7

		12	80,2	89,5	95,3	96,5	97,8
	200	4	40,4	68,6	86	89,5	93,3
		6	69,2	83,8	92,8	94,6	96,6
		8	80,8	89,9	95,5	96,6	97,9
		12	90,1	94,7	97,7	98,2	98,9
	300	4	60,3	79,1	90,7	93	95,6
		6	79,5	89,2	95,2	96,4	97,9
		8	87,2	93,3	97	97,7	98,6
		12	93,4	96,5	98,4	98,8	99,3
	400	4	70,2	84,3	93	94,8	96,7
		6	84,6	91,9	96,4	97,3	98,3
		8	90,4	94,9	97,7	98,3	98,9
		12	95,1	97,4	98,8	99,1	99,5

КПД ВЧ индуктора при D=3см

Длина l _р , см	Частота f, кГц	Sfer, см ²	КПД, %				
			P1=100Вт	P2=150Вт	P3=250Вт	P4=300Вт	P5=400Вт
40	100	4	96,5	98,1	99,2	99,4	99,6
		6	98,2	99,1	99,6	99,7	99,8
		8	98,9	99,4	99,72	99,8	99,88
		12	99,4	99,7	99,84	99,9	99,94
	200	4	98,2	99,1	99,6	99,7	99,8
		6	99,1	99,5	99,76	99,83	99,9
		8	99,4	99,73	99,87	99,9	99,94
		12	99,71	99,85	99,93	99,96	99,97
	300	4	98,8	99,4	99,72	99,8	99,88
		6	99,4	99,7	99,84	99,89	99,93
		8	99,6	99,8	99,91	99,93	99,96
		12	99,81	99,9	99,95	99,97	99,98
	400	4	99,1	99,7	99,8	99,86	99,91
		6	99,5	99,76	99,89	99,92	99,95
		8	99,72	99,85	99,93	99,95	99,97
		12	99,85	99,92	99,96	99,97	99,98
60	100	4	88,7	94,1	97,4	98	98,8
		6	94,2	96,9	98,6	98,9	99,4
		8	96,4	98,1	99,2	99,4	99,6
		12	98,1	99	99,6	99,7	99,8
	200	4	94,4	97	98,7	99	99,4
		6	97,1	98,5	99,3	99,5	99,7
		8	98,2	99,1	99,6	99,7	99,8
		12	99,1	99,5	99,76	99,83	99,9
	300	4	96,2	98,1	99,1	99,4	99,6
		6	98,1	99	99,6	99,7	99,78
		8	98,8	99,4	99,72	99,8	99,88
		12	99,4	99,7	99,85	99,89	99,93
400	4	97,2	98,5	99,3	99,5	99,7	
	6	98,5	99,2	99,6	99,7	99,83	

		8	99,1	99,5	99,8	99,87	99,93
		12	99,5	99,73	99,89	99,92	99,95
80	100	4	74,2	86,4	93,9	95,4	97,1
		6	86,7	93	96,9	97,6	98,6
		8	91,7	95,6	98	98,5	99,1
		12	95,7	97,7	99	99,2	99,5
	200	4	87,1	93,1	96,9	97,7	98,6
		6	93,3	96,5	98,4	98,8	99,3
		8	95,8	97,8	99	99,3	99,5
		12	97,8	98,9	99,5	99,6	99,8
	300	4	91,4	95,5	97,9	98,5	99
		6	95,6	97,7	98,9	99,2	99,5
		8	97,2	98,5	99,4	99,5	99,7
		12	98,6	99,3	99,7	99,8	99,85
	400	4	93,5	96,6	98,5	98,9	99,3
		6	96,7	98,3	99,2	99,4	99,6
		8	97,9	98,9	99,5	99,6	99,8
		12	98,9	99,4	99,7	99,8	99,87
100	100	4	50,9	74,1	88,4	91,4	94,5
		6	74,6	86,7	94	95,5	97,2
		8	84,1	91,7	96,3	97,2	98,2
		12	91,8	95,7	98,1	98,6	99,1
	200	4	75,4	87,1	94,2	95,7	97,3
		6	87,3	93,3	97	97,8	98,6
		8	92,1	95,8	98,1	98,6	99,1
		12	95,9	97,9	99	99,3	99,6
	300	4	83,6	91,4	96,2	97,1	98,2
		6	91,5	95,5	98	98,5	99,1
		8	94,7	97,2	98,8	99,1	99,4
		12	97,3	98,5	99,4	99,5	99,7
	400	4	87,7	93,5	97,1	97,8	98,6
		6	93,7	96,7	98,5	98,9	99,3
		8	96,1	97,9	99,1	99,3	99,6
		12	98	98,9	99,5	99,6	99,8
120	100	4	17	56,3	80,5	85,4	90,7
		6	57,1	77,4	89,9	92,4	95,2
		8	73,2	85,9	93,7	95,3	97
		12	86,1	92,7	96,8	97,6	98,5
	200	4	58,5	78,1	90,2	92,7	95,4
		6	78,6	88,7	94,9	96,2	97,6
		8	86,6	92,9	96,8	97,6	98,5
		12	93,1	96,3	98,4	98,8	99,2
	300	4	72,3	85,4	93,5	95,1	96,9
		6	85,7	92,5	96,6	97,5	98,4
		8	91,1	95,3	97,9	98,4	99
		12	95,4	97,5	98,9	99,2	99,5
	400	4	79,2	89,1	95,1	96,4	97,7
		6	89,3	94,3	97,5	98,1	98,8
		8	93,3	96,5	98,4	98,8	99,3

		12	96,5	98,2	99,2	99,4	99,6
--	--	----	------	------	------	------	------

КПД ВЧ индуктора при D=4см

Длина l _р , см	Частота f, кГц	Sfer, см ²	КПД, %					
			P1=100Вт	P2=150Вт	P3=250Вт	P4=300Вт	P5=400Вт	
40	100	4	97,2	98,5	99,4	99,5	99,7	
		6	98,6	99,3	99,6	99,7	99,85	
		8	99,1	99,5	99,8	99,87	99,93	
		12	99,5	99,73	99,89	99,92	99,95	
	200	4	98,6	99,3	99,7	99,77	99,85	
		6	99,3	99,6	99,8	99,87	99,92	
		8	99,5	99,73	99,9	99,92	99,95	
		12	99,77	99,88	99,94	99,96	99,98	
	300	4	99,1	99,5	99,8	99,9	99,91	
		6	99,5	99,73	99,89	99,92	99,95	
		8	99,7	99,84	99,93	99,95	99,97	
		12	99,84	99,92	99,96	99,97	99,98	
	400	4	99,3	99,6	99,84	99,88	99,93	
		6	99,6	99,81	99,92	99,94	99,96	
		8	99,77	99,88	99,95	99,96	99,98	
		12	99,87	99,94	99,97	99,98	99,99	
	60	100	4	91,1	95,3	97,9	98,4	99
			6	95,4	97,5	98,9	99,2	99,5
			8	97,1	98,5	99,3	99,5	99,7
			12	98,5	99,2	99,6	99,7	99,83
200		4	95,5	97,7	98,9	99,2	99,5	
		6	97,7	98,8	99,4	99,6	99,75	
		8	98,6	99,3	99,7	99,77	99,85	
		12	99,3	99,6	99,83	99,87	99,92	
300		4	97	98,5	99,3	99,5	99,7	
		6	98,5	99,2	99,6	99,73	99,83	
		8	99	99,5	99,76	99,83	99,9	
		12	99,5	99,73	99,88	99,91	99,95	
400		4	97,8	98,8	99,5	99,6	99,75	
		6	98,8	99,4	99,72	99,8	99,88	
		8	99,3	99,6	99,84	99,87	99,92	
		12	99,63	99,8	99,91	99,93	99,96	
80		100	4	79,5	89,2	95,2	96,4	97,7
			6	89,4	94,4	97,5	98,1	98,8
			8	93,4	96,5	98,4	98,8	99,3
			12	96,6	98,2	99,2	99,4	99,6
	200	4	89,8	94,6	97,6	98,2	98,9	
		6	94,7	97,2	98,8	99,1	99,4	
		8	96,7	98,3	99,2	99,4	99,6	
		12	98,3	99,1	99,6	99,7	99,8	
	300	4	93,2	96,4	98,4	98,8	99,2	
		6	96,5	98,1	99,2	99,4	99,6	

		8	97,8	98,8	99,5	99,6	99,8		
		12	98,9	99,4	99,7	99,8	99,88		
	400		4	94,9	97,3	99	99,1	99,4	
			6	97,4	98,6	99,4	99,5	99,7	
			8	98,3	99,2	99,6	99,7	99,83	
			12	99,1	99,5	99,8	99,83	99,9	
	100	100	4	61,1	79,5	90,8	93,1	95,7	
			6	79,9	89,4	95,3	96,5	97,8	
			8	87,4	93,4	97	97,8	98,6	
			12	93,5	96,6	98,5	98,9	99,3	
		200		4	80,5	89,7	95,4	96,6	97,8
				6	89,9	94,7	97,6	98,2	98,9
8				93,7	96,7	98,5	98,9	99,3	
12				96,8	98,3	99,2	99,4	99,6	
300			4	87,1	93,1	96,9	97,7	98,6	
			6	93,3	96,5	98,4	98,8	99,3	
			8	95,8	97,8	99	99,3	99,5	
			12	97,8	98,8	99,5	99,6	99,8	
400		4	90,3	94,9	97,7	98,3	98,9		
		6	95	97,4	98,8	99,1	99,4		
		8	96,9	98,3	99,3	99,4	99,7		
		12	98,4	99,2	99,6	99,7	99,8		
120	100	4	34,2	65,3	84,5	88,4	92,6		
		6	66	82,1	92	94	96,2		
		8	78,7	88,8	95	96,3	97,6		
		12	89,1	94,2	97,4	98,1	98,8		
	200		4	67,1	82,7	92,2	94,2	96,3	
			6	83	91,1	96	97	98,1	
			8	89,4	94,4	97,5	98,1	98,8	
			12	94,5	97,1	98,7	99	99,4	
	300		4	78,1	88,4	94,8	96,1	97,6	
			6	88,7	94,1	97,3	98	98,7	
			8	92,9	96,3	98,3	98,7	99,2	
			12	96,3	98,1	99,1	99,4	99,6	
400		4	83,5	91,3	96,1	97,1	98,2		
		6	91,5	95,5	98	98,4	99,1		
		8	94,7	97,2	98,8	99,1	99,4		
		12	97,3	98,5	99,4	99,5	99,7		

КПД ВЧ индуктора при D=5см

Длина l _{pl} , см	Частота f, кГц	Sfer, см ²	КПД, %				
			P1=100Вт	P2=150Вт	P3=250Вт	P4=300Вт	P5=400Вт
40	100	4	97,6	98,7	99,5	99,6	99,73
		6	98,8	99,4	99,72	99,8	99,88
		8	99,2	99,6	99,84	99,89	99,93
		12	99,6	99,79	99,91	99,93	99,96
	200	4	98,8	99,3	99,72	99,8	99,88

		6	99,4	99,7	99,84	99,89	99,93	
		8	99,6	99,8	99,91	99,93	99,96	
		12	99,8	99,89	99,95	99,97	99,98	
	300	4	99,2	99,6	99,8	99,87	99,91	
		6	99,6	99,8	99,91	99,95	99,96	
		8	99,75	99,87	99,94	99,96	99,97	
		12	99,87	99,93	99,97	99,98	99,99	
	400	4	99,4	99,7	99,86	99,9	99,94	
		6	99,7	99,84	99,93	99,95	99,97	
		8	99,81	99,9	99,95	99,97	99,98	
		12	99,91	99,95	99,98	99,98	99,99	
	60	100	4	92,4	96,1	98,2	98,7	99,2
6			96,1	97,9	99,1	99,3	99,6	
8			97,6	98,7	99,4	99,6	99,73	
12			98,7	99,3	99,7	99,77	99,85	
200		4	96,2	98	99,1	99,3	99,6	
		6	98	99	99,6	99,7	99,78	
		8	98,8	99,4	99,72	99,8	99,88	
		12	99,4	99,7	99,85	99,89	99,93	
300		4	97,5	98,7	99,4	99,6	99,73	
		6	98,7	99,3	99,7	99,77	99,85	
		8	99,2	99,6	99,8	99,87	99,91	
		12	99,6	99,8	99,9	99,93	99,95	
400		4	98,1	99	99,6	99,7	99,8	
		6	99	99,5	99,76	99,83	99,9	
		8	99,4	99,7	99,86	99,89	99,93	
		12	99,7	99,83	99,92	99,94	99,97	
80		100	4	82,7	90,9	95,9	96,9	98,1
			6	91,1	95,3	97,9	98,4	99
			8	94,4	97,1	98,7	99	99,4
			12	97,1	98,5	99,3	99,5	99,7
		200	4	91,3	95,5	97,9	98,5	99
			6	95,5	97,7	98,9	99,2	99,5
			8	97,2	98,5	99,4	99,5	99,7
			12	98,6	99,3	99,6	99,7	99,85
	300	4	94,2	96,9	98,6	98,9	99,4	
		6	97,1	98,5	99,3	99,5	99,7	
		8	98,1	99	99,6	99,7	99,8	
		12	99,1	99,5	99,8	99,83	99,9	
400	4	95,7	97,7	99	99,2	99,5		
	6	97,8	98,8	99,5	99,6	99,8		
	8	98,6	99,3	99,7	99,8	99,85		
	12	99,3	99,6	99,8	99,87	99,93		
100	100	4	67,1	82,7	92,2	94,2	96,3	
		6	83	91	96	97	98,1	
		8	89,4	94,4	97,5	98,1	98,8	
		12	94,5	97,1	98,7	99	99,4	
	200	4	83,5	91,3	96,1	97,1	98,2	
		6	91,5	95,5	98	98,5	99,1	

		8	94,7	97,2	98,8	99,1	99,4	
		12	97,3	98,5	99,4	99,5	99,7	
	300	4	89,1	94,2	97,4	98,1	98,8	
		6	94,3	97	98,7	99	99,4	
		8	96,5	98,1	99,2	99,4	99,6	
		12	98,2	99,1	99,6	99,7	99,8	
	400	4	91,8	95,7	98,1	98,5	99,1	
		6	95,7	97,7	99	99,2	99,5	
		8	97,3	98,5	99,4	99,5	99,7	
		12	98,6	99,3	99,7	99,8	99,85	
	120	100	4	44,3	70,7	86,9	90,2	93,8
			6	71,2	84,9	93,2	94,9	96,8
			8	82	90,5	95,8	96,8	97,9
			12	90,7	95,1	97,8	98,4	98,9
		200	4	72,1	85,3	93,4	95,1	96,9
			6	85,6	92,4	96,6	97,5	98,4
8			91	95,3	97,9	98,4	99	
12			95,4	97,5	98,9	99,2	99,5	
300		4	81,4	90,2	95,6	96,7	97,9	
		6	90,4	94,9	97,8	98,3	98,9	
		8	94	96,9	98,6	98,9	99,3	
		12	96,6	98,5	99,3	99,5	99,7	
400		4	86,1	92,7	96,7	97,5	98,5	
		6	92,8	96,2	98,3	98,7	99,2	
		8	95,5	97,6	98,9	99,2	99,5	
		12	97,7	98,8	99,4	99,6	99,75	

КПД ВЧ индуктора при D=8см

Длина l _{pl} , см	Частота f, кГц	S _{фер} , см ²	КПД, %					
			P1=100Вт	P2=150Вт	P3=250Вт	P4=300Вт	P5=400Вт	
40	100	4	98,3	99,1	99,6	99,7	99,8	
		6	99,1	99,5	99,76	99,83	99,9	
		8	99,4	99,73	99,88	99,9	99,94	
		12	99,71	99,84	99,93	99,95	99,97	
	200	4	99,1	99,5	99,8	99,87	99,91	
		6	99,5	99,73	99,89	99,92	99,95	
		8	99,78	99,85	99,94	99,95	99,97	
		12	99,86	99,92	99,96	99,97	99,99	
	300	4	99,4	99,7	99,86	99,9	99,94	
		6	99,7	99,84	99,93	99,95	99,97	
		8	99,82	99,9	99,96	99,97	99,98	
		12	99,9	99,94	99,97	99,98	99,99	
	400	4	99,6	99,77	99,89	99,92	99,95	
		6	99,78	99,89	99,95	99,96	99,98	
		8	99,86	99,93	99,96	99,98	99,99	
		12	99,73	99,96	99,98	99,99	99,99	
	60	100	4	94,5	97,1	98,7	99	99,4

		6	97,2	98,5	99,3	99,5	99,7
		8	98,2	99,1	99,6	99,7	99,8
		12	99,1	99,5	99,76	99,83	99,9
	200	4	97,3	98,5	99,4	99,5	99,7
		6	98,6	99,3	99,6	99,7	99,85
		8	99,1	99,5	99,8	99,87	99,93
		12	99,5	99,73	99,89	99,92	99,95
	300	4	98,2	99,1	99,6	99,7	99,8
		6	99,1	99,5	99,76	99,83	99,9
		8	99,4	99,67	99,86	99,89	99,94
		12	99,7	99,84	99,93	99,94	99,97
	400	4	98,6	99,3	99,7	99,77	99,85
		6	99,3	99,6	99,8	99,87	99,92
		8	99,6	99,77	99,89	99,92	99,95
		12	99,77	99,88	99,94	99,96	99,98
80	100	4	87,4	93,4	97	97,8	98,6
		6	93,5	96,6	98,5	98,9	99,3
		8	95,9	97,9	99	99,3	99,6
		12	97,9	98,8	99,5	99,6	99,78
	200	4	93,7	96,7	98,5	98,9	99,3
		6	96,8	98,3	99,2	99,4	99,6
		8	98	98,9	99,5	99,6	99,78
		12	98,9	99,5	99,72	99,8	99,88
	300	4	95,8	97,8	99	99,3	99,5
		6	97,8	98,8	99,5	99,6	99,78
		8	98,6	99,3	99,7	99,77	99,85
		12	99,3	99,6	99,84	99,88	99,92
	400	4	96,9	98,3	99,3	99,4	99,7
		6	98,4	99,2	99,6	99,7	99,83
		8	99	99,5	99,76	99,83	99,9
		12	99,5	99,73	99,88	99,91	99,94
100	100	4	76,1	87,4	94,4	95,8	97,3
		6	87,6	93,5	97,1	97,8	98,6
		8	92,3	95,9	98,2	98,6	99,1
		12	96	97,9	99,1	99,3	99,6
	200	4	88,1	93,7	97,2	97,9	98,7
		6	93,8	96,7	98,6	98,9	99,3
		8	96,1	97,9	99,1	99,3	99,6
		12	98	98,9	99,5	99,6	99,78
	300	4	92,1	95,8	98,1	98,6	99,1
		6	95,9	97,8	99	99,3	99,6
		8	97,4	98,7	99,4	99,5	99,7
		12	98,7	99,3	99,7	99,77	99,85
	400	4	94,1	96,9	98,6	98,9	99,3
		6	96,9	98,5	99,3	99,5	99,7
		8	98,1	99	99,6	99,7	99,78
		12	99	99,5	99,76	99,83	99,9
120	100	4	59,5	78,7	90,5	92,9	95,5
		6	79,1	89	95,1	96,3	97,7

	8	86,9	93,1	96,9	97,7	98,6
	12	93,3	96,5	98,4	98,8	99,3
200	4	79,8	89,4	95,2	96,4	97,7
	6	89,6	94,5	97,6	98,2	98,8
	8	93,5	96,5	98,5	98,8	99,3
	12	96,6	98,2	99,2	99,4	99,6
300	4	86,5	92,9	96,8	97,6	98,5
	6	93,1	96,3	98,4	98,8	99,2
	8	95,6	97,7	98,9	99,2	99,5
	12	97,7	98,8	99,5	99,6	99,75
400	4	89,9	94,7	97,6	98,2	98,9
	6	94,8	97,3	98,8	99,1	99,4
	8	96,7	98,3	99,2	99,4	99,6
	12	98,3	99,2	99,6	99,7	99,8