

Аннотация

Проведены исследования влияния температуры окружающей среды в диапазоне от -20 до +60 на электрические характеристики лампы рефлекторного типа. По трансформаторной модели проведен расчет тока плазмы и напряжения плазменного витка, проанализированы кривые изменения тока и напряжения катушки в зависимости от $T_{окр}$. Результаты исследований дополняют известные данные о параметрах индукционного разряда в парах ртути и могут быть использованы для создания более эффективных источников видимого излучения на основе ламп рефлекторного типа.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

«МЭИ»

Институт ИРЭ ЭТФ Кафедра Светотехники

Направление Электроника и наноэлектроника

ЗАДАНИЕ НА МАГИСТЕРСКУЮ
ДИССЕРТАЦИЮ

по программе подготовки магистров Теоретическая и прикладная
светотехника

Тема Влияние температуры окружающей среды на электрические
характеристики индукционной люминесцентной лампы

Время выполнения работы с _____ по _____ 20 ____ г.

Студент Волох С.В. ЭР-04М-16
Фамилия, и., о. группа подпись

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

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

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 ООО «ВНИСИ»

Москва « _____ » _____ 20 ____ г.

План работы над магистерской диссертацией

№ п\п	Содержание разделов	Срок выпол- нения	Трудоём- кость в %
I.	Теоретическая часть		
	Изучение плазменного разряда низкого давления	01.09.17 – 15.10.17	10%
	Обзор существующих источников излучения	16.10.17 – 30.11.17	5%
	Обзор моделей расчёта индукционных ламп	01.12.17 – 31.12.17	10%
II.	Экспериментальная часть	10.01.18	
	Разработка методики проведения эксперимента	– 31.01.18	5%
	Сборка экспериментальной установки	01.03.18 – 01.04.18 11.04.18	10%
	Проведение экспериментальных исследований	– 15.05.18	30%
	Обработка и анализ результатов измерений	16.05.18 – 20.05.18	15%
III.	Расчётная часть		
	Расчеты	21.05.18 – 1.06.18	5%
IV.	Оформление диссертации	1.06.15	
	Написание и оформление диссертации	– 20.06.18	10%

Содержание

Список сокращений.....	7
1. Введение.....	8
1.1. Актуальность работы.....	8
1.2. Научная новизна.....	9
2. Анализ литературы.....	9
2.1.Краткая история развития индукционных ламп.....	9
2.2. Характеристики индукционных ламп.....	17
2.3 Применение БИЛЛ.....	18
2.4. Основы физики индукционного разряда	19
3. Постановка задачи.....	22
4. Экспериментальная часть.....	23
4.1. Объект исследования.....	24
4.2. Спецификация средств измерения	25
4.3 Методика проведения измерений и экспериментальная установка.....	26
4.4 Метод проведения испытаний в климатической камере.....	28
4.5 Проведение испытаний в климатической камере.....	30
4.6 Погрешности измерений	32
5. Результаты экспериментальных исследований	34
5.1 Расчет для нормальных климатических условий.....	34
5.1.1 Расчет электрических параметров.....	34
5.1.2 Расчет потерь в индукторе.....	36
5.1.3 Гармонический состав тока.....	43
5.2 Сводная таблица результатов измерений.....	46
6. Анализ полученных результатов.....	47
7. Заключение.....	51
Список литературы.....	52
Приложение.....	53

Список сокращений

ВЧ – высокочастотный, высокая частота;

КПД – коэффициент полезного действия;

БИЛЛ – Безэлектродная люминесцентная лампа;

НД – низкое давление;

НСП – неисключённая систематическая погрешность;

СКО – среднеквадратичное отклонение;

УФ – ультрафиолет;

ЭПРА – электронный пускорегулирующий аппарат.

Токр – температура окружающей среды

ИС – источник света

ЛЛ – люминесцентная лампа

1. Введение

1.1.Актуальность работы

На сегодняшний день значительное количество производимой электроэнергии расходуется на освещение. Идет разработка новых источников света, усовершенствование ПРА за счет уменьшения потерь мощности в нем и увеличения срока службы. Так одной из модификаций ЛЛ стала безэлектродная индукционная люминесцентная лампа (далее - БИЛЛ).

БИЛЛ - газоразрядная лампа, в которой первичным источником света служит плазма, возникающая в результате ионизации газа/паров металла высокочастотным электромагнитным полем. Отсутствие металлических электродов внутри разрядной колбы значительно увеличивает срок службы и улучшает стабильность параметров БИЛЛ. В БИЛЛ, как и в других ЛЛ, для возбуждения свечения люминофора используется ультрафиолетовое излучение разряда в парах ртути НД в смеси с инертными газами (аргоном, криптоном). Поддержание разряда осуществляется за счет энергии электромагнитного поля, которое генерируется высокочастотным (ВЧ) индуктором, размещенным в непосредственной близости от разрядной колбы. На сегодняшний день явно недостаточно экспериментальных и теоретических данных, необходимых для оптимизации источников света на основе безэлектродных ламп, в частности, с колбой рефлекторного типа. В связи с этим, проведение экспериментальных исследований электрических и светотехнических характеристик БИЛЛ такого типа является актуальной задачей.

1.2. Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем. Впервые экспериментально получены в широком интервале температур окружающей среды от - 20 до + 60 С электрические характеристики индукционных ламп с колбой рефлекторного типа и с внутренней полостью. Полученные результаты позволяют наметить дальнейшие пути исследований, целью которых является создание высокоэффективного с высоким сроком службы источника оптического излучения на основе индукционного разряда низкого давления в парах ртути, способного заменить существующие короткоживущие электродные разрядные лампы.

2. Анализ литературы

2.1 Краткая история развития индукционных ламп.

История развития индукционных ламп насчитывает более ста лет. Еще Никола Тесла в 90 – ые годы XIX – го столетия демонстрировал опыты по беспроводной передаче мощности безэлектродным лампам и лампам накаливания. Первые реально выполнимые патенты безэлектродных люминесцентных ламп появились в 30 – е годы XX – го столетия. Например, патент, полученный Беттенодом в 1936 году [1]. Разрядная колба имела сферическую форму и цилиндрическое углубление (полость), где размещалась катушка с ферромагнитным сердечником (рис. 2.1.). Лампа была наполнена смесью криптона и ксенона.

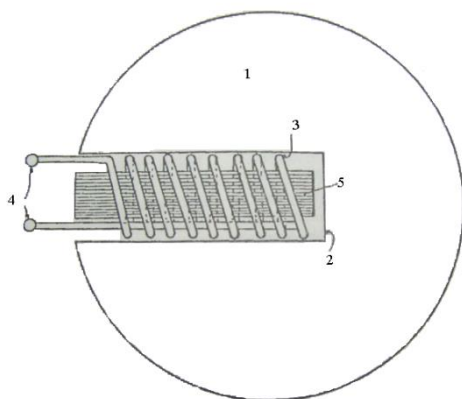


Рис.2.1 Безэлектродная индукционная лампа, предложенная Беттенодом (1 – колба; 2- цилиндрическая полость; 3 – индуктивная катушка; 4 – клеммы; 5 – ферромагнитный сердечник) [1].

Впервые практическое применение безэлектродного индукционного разряда в технологии газоразрядных люминесцентных ламп было сделано Дж. Андерсоном (компания General Electric). Он сконструировал и разработал безэлектродную индукционную люминесцентную лампу, где трансформатором служил замкнутый ферромагнитный магнитопровод, охватывающий разрядную трубку [2]. Позже этот тип индукционных ламп получил название «лампы трансформаторного типа».

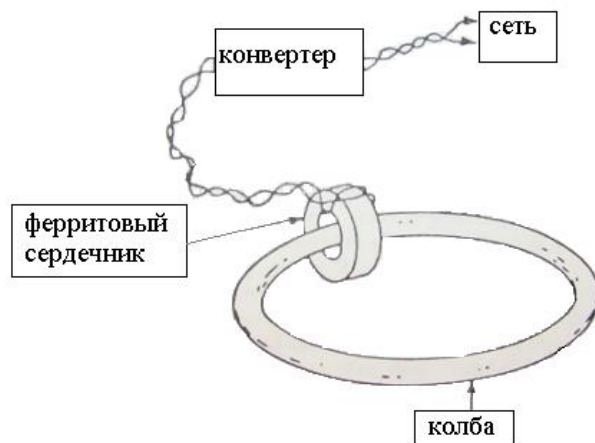


Рис. 2.2. Концептуальный рисунок индукционного источника света лампы Дж. Андерсона [2].

Источник света, предложенный Дж. Андерсоном, включал конвертер, преобразовывающий промышленную частоту 50 Гц в высокую частоту от 50 кГц до 400 кГц, разрядную замкнутую трубку диаметром 3 см и ферромагнитный кольцевой сердечник (магнитопровод) внешним диаметром 8,9 см и внутренним - 3,8 см, охватывающий разрядную трубку (рис. 2.2),

Однако, источник света получился неэффективным: потребляя мощность 113 Вт, он давал всего 3000 люмен светового потока. То есть, его световая отдача была 26.5 лм/Вт, что ненамного превышает световую отдачу лампы накаливания. Одной из основных причин низкой эффективности лампы Андерсона были большие потери мощности в ферритовом магнитопроводе, достигающие до 72 Вт, что было связано с неоптимальными конструктивными параметрами разрядной трубки (малый диаметр 3 см и большая длина разрядной трубки) и низкой мощностью плазмы (40-50 Вт). Как было показано в [3], в этих условиях напряженность ВЧ поля плазмы и ВЧ напряжение на плазменном витке весьма велики, что требует высоких значений магнитной индукции в магнитопроводе. Соответственно, высоки на рабочих частотах источника света (50-400 кГц) удельные потери мощности в использованных Андерсоном ферромагнетиках, а мощность потерь в магнитопроводе оказалась в 2.5 раза больше, чем мощность,

потребляемая плазмой и идущая (частично) на генерацию ультрафиолетового излучения [3].

К концу 70-х годов XX века Андерсон разработал компактную индукционную люминесцентную лампу с кольцевым магнитопроводом, размещенным в объеме сферической колбы (рис. 2.3). Лампа была представлена на проходившем в 1983 году во Франции Третьем Международном Симпозиуме по источникам света [4]. Лампа работала на частоте 100 кГц; ее мощность составляла 39 Вт, из которых 3 Вт потреблялись ферритовым сердечником, световой поток составлял 2000 лм, а световая – 51 лм/Вт.



Рис. 2.3. Внешний вид лампы Андерсона [4].

Промышленный выпуск безэлектродных индукционных люминесцентных ламп (БИЛЛ) начался в последнем десятилетии прошлого века. На рис. 2.4 приведены комплекты трех индукционных источников света модели QL (Quality Lighting), разработанных и выпускаемых фирмой Philips с 1991 года. Лампы работают на частоте 2.65 МГц с выносным ПРА (рис. 4). Изначально ассортимент QL состоял из ламп двух мощностей: 55 Вт (световой поток 3500 лм, световая отдача 63.3 лм/Вт) и 85 Вт (световой поток 6000 лм и световая отдача 70.6 лм/Вт) [5]. В 1997 году Philips объявила о выпуске более

мощной 165-ваттной лампы серии QL. Заявленный срок службы БИЛЛ модели QL – 100000 час.



Рис. 2.4. Лампы QL фирмы Philips.

Форма разрядной колбы близка к форме лампы накаливания. На своей оси она имеет цилиндрическое углубление (полость), где размещен ВЧ индуктор (индуктивная катушка и ферритовый сердечник). Давление инертного газа в колбе не превышает 0,5 мм рт.; давление паров ртути в колбе контролируется температурой амальгамы, расположенной в холодной зоне колбы [5,6]. Внутренняя (вакуумная) поверхность колбы покрыта люминофором, а ее стенки покрыты светопрозрачной пленкой, предохраняющей стекло колбы от прямого взаимодействия с плазмой разряда и обеспечивающей медленный спад светового потока (спад менее 10% после 10 тыс. ч. и менее 25% после 60 тыс. ч. работы лампы [5,6]). Катушка и сердечник поддерживаются при температурах ниже 160°C охлаждающим устройством, расположенным на оси колбы и соединенным с базом лампы, отводящей тепло в радиатор (на рисунке не показан). Для снижения электромагнитных помех лампа помещалась либо в специальный экран, либо на внешнюю поверхность колбы наносились проводящие покрытия. Спектр излучения лампы модели QL 85 приведен на рис. 2.5.

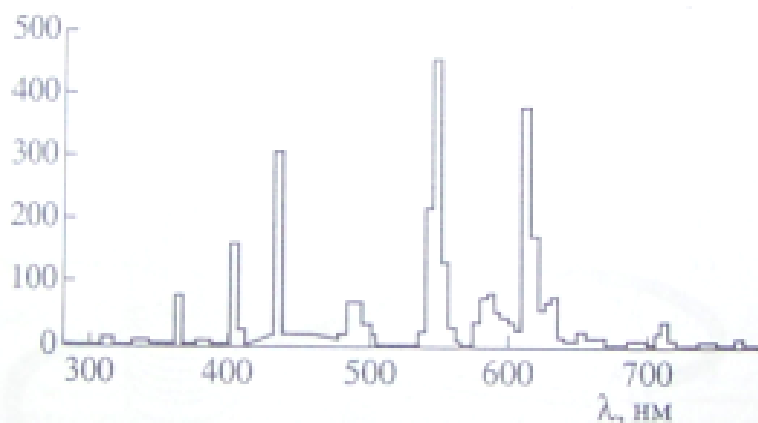


Рис. 2.5. Спектр лампы QL 85 Вт

Работы над безэлектродными лампами также велись в Японии. В 1991 году компания Matsushita представила на японский рынок безэлектродный индукционный люминесцентный источник света модели Everlight, работающий на частоте 13.56 МГц. Разрядная колба сферической формы охватывалась с атмосферной стороны индуктивной катушкой, возбуждавшей в колбе индукционный разряд в смеси паров ртути и инертного газа. Работая на мощности 27 Вт со средним сроком службы 40000 часов, лампа давала световой поток 1000 лм, имея световую отдачу 37 лм/Вт [6].

В 1994 году General Electric выпустила на рынок компактную БИЛЛ, в которой ВЧ - генератор был размещен в цоколе лампы (рис. 2.6) [7]. Название Genura состоит из двух слов: GE и Nura. Nura является индийским словом, означающим “свет”. Как и в лампах типа QL, в лампе Genura катушка с сердечником размещаются в полости, расположенной на оси колбы. По форме колбы и габаритным размерам лампа Genura™R80 соответствует зеркальной ЛН типа R80 (100 Вт), то есть длина этой лампы составляет 130 мм, диаметр – 80 мм. В прицокольной части лампы размещен транзисторный генератор на частоту 2.65 МГц, потребляющий 23 Вт от сети переменного тока с напряжением 230 В. Колба лампы Genura изнутри покрыта люминофором марки “Полилюкс” и наполнена ксеноном с небольшим количеством ртути [7]. Лампа зажигается и перезажигается почти мгновенно. Ее срок службы составляет 15 тыс. ч. и определяется спадом светового потока на 30%. Световая отдача лампы равна 50 лм/Вт при

световом потоке 1100 лм. Общий индекс цветопередачи $R_a \geq 82$, цветовая температура излучения 2700 К и 3000 К.



Рис. 2.6. Внешний вид лампы Genura [7]

Лампа Genura разрабатывалась как замена лампы накаливания мощностью до 100 Вт со стандартным цоколем E27, но форма ее колбы (рефлекторная R-типа) несколько отличается от колбы лампы накаливания, а значит, отличается и светораспределение. Замена лампы накаливания лампой Genura обеспечивает экономию электроэнергии в 4 – 5 раз и повышает продолжительность эксплуатации в 10-15 раз [6,7].

В середине 90-х годов XX века в компании Osram были разработаны безэлектродные индукционные люминесцентные лампы с замкнутым ферромагнитным магнитопроводом, работающие на частоте 250 кГц [3, 8], получившие название Endura. Лампа включает в себя разрядную замкнутую трубку, формирующую скругленный по углам прямоугольник. В коротких участках прямоугольника расположены два ВЧ индуктора, состоящие из кольцевого магнитопровода и первичной индуктивной катушки (рис. 2.7) [8]. По конструкции эти лампы напоминают лампы Андерсона, но за счет оптимального выбора тока лампы, диаметра и длины разрядной трубки и давления буферного газа потери в магнитопроводах малы (< 6 Вт), и потому энергетическая эффективность (и световая отдача) ламп Endura существенно выше, чем ламп Андерсона [3,6,8].

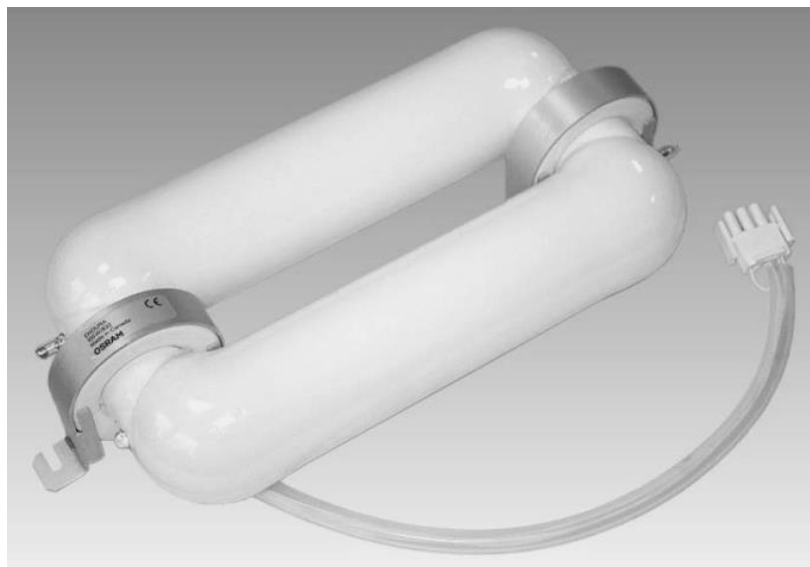


Рис. 2.7. Внешний вид лампы Endura [3, 8]

Фирма OSRAM выпускает индукционные источники света модели Endura на двух уровнях мощности: 100 и 150 Вт. Длина лампы мощностью 100 Вт составляет 313 мм, ширина – 139 мм; длина лампы мощностью 150 Вт равна 414 мм, а ширина – 139 мм. Выпускаются лампы Endura со световой отдачей 80 лм/Вт, с температурами T_u от 2700 до 6000 К. Высокое качество цветопередачи с индексом $R_a \geq 80$ обусловлено применением узкополосных люминофорных смесей марки LUMILUX PLUS. Лампы надежно зажигаются при температуре -30°C . Их срок службы составляет 60 тыс. ч. и ограничен долговечностью электронных генераторов [5, 8].

В 2003 году японская фирма Matsushita Electric Industry представила безэлектродную компактную индукционную люминесцентную лампу со встроенным в цоколе балластом (рис. 2.8). Лампа, названная Pa-look Ball, создавалась как непосредственная замена 60- и 100 - ваттной лампы накаливания [6, 9]. Как и в лампах серии QL и Genuga, колба лампы имеет на оси полость, в которой размещены катушка индуктивности и ферромагнитный сердечник. Однако, работает эта лампа на более низкой

(чем 2.65 МГц) частоте 480 кГц, что позволило значительно повысить ее эффективность за счет меньших потерь мощности в ЭПРА.



Рис.2.8. Внешний вид японской безэлектродной люминесцентной индуктивной лампы для замены лампы накаливания [6, 9].

При потребляемой мощности 12 Вт световой поток лампы равен 810 лм, что соответствует световой отдаче 68 лм/Вт. Цветовая температура 3000 К, индекс цветопередачи. В качестве буферного газа использовалась смесь $Ar - Ne - Kr$.

В 2001 – 2006 г. компанией Matsushita Electric Works была разработана серия БИЛЛ марки Everlight, работающих на низкой частоте 135 кГц и на мощностях 55, 150 (рис. 2.9) и 250 Вт со световой отдачей, превышающей 80 лм/Вт. Световой поток лампы мощностью 55 Вт составлял 4500 лм, лампы мощностью 150 Вт – 14000 лм, а 240 Вт – 22000 лм [6]. Лампы Everlight предназначены для замены короткоживущих и малоэффективных ртутных ламп высокого давления и используются главным образом для наружного освещения, а также для освещения производственных помещений и торговых центров.



Рис 2.9 Общий вид БИЛЛ рефлекторного типа, Everlight 150 (ЭПРА не показан).

2.2. Характеристики индукционных ламп.

- Заявляемый производителями срок службы индукционных ламп: 60 000—150 000 часов (опытные данные отсутствуют). Благодаря безэлектродному исполнению срок службы значительно выше, чем у традиционных электродных люминесцентных ламп.
- Номинальная светоотдача: > 70 лм/Вт и при увеличении мощности лампы увеличивается световой поток, при этом снижается срок службы за счет повышенной эксплуатационной нагрузки.
- Производители заявляют высокий уровень светового потока после длительного использования. К примеру, после 60 000 часов наработки уровень светового потока по расчетам должен составлять свыше 70 % от первоначального (60000 часов=13 лет использования в 12 часовом режиме).
- Мгновенное включение/выключение (отсутствует время ожидания между переключениями), что является хорошим преимуществом перед большинством газоразрядных ламп (ртутной лампой ДРЛ, натриевой лампой ДНаТ и металлогалогенной лампой ДРИ), для которых требуется

время для выхода на рабочий режим и время остывания 5—15 минут после внезапного отключения электросети).

- Неограниченное количество циклов включения/выключения.
- Цветопередача люминесцентных безэлектродных индукционных ламп аналогична цветопередаче обычных ртутных газоразрядных ламп с люминофором, так как они обычно наполнены тем же рабочим газом и используют те же люминофоры.
- Так же как и люминесцентные лампы, безэлектродные индукционные лампы требуют специальной утилизации из-за присутствия ртутных соединений и электронных компонентов. [1]

2.3. Применение БИЛЛ.

Индукционные лампы применяются для наружного и внутреннего освещения, особенно в местах, где требуется хорошее освещение с высокой светоотдачей, длительным сроком службы: улицы, магистрали, тоннели, промышленные и складские помещения, производственные цеха, автостоянки, стадионы. Ввиду присутствия высокочастотных электромагнитных излучений не рекомендуется установка в аэропорты, железнодорожные станции, автозаправочные станции.

Основным из главных преимуществ индукционных осветительных приборов является высокая в сравнении с другими лампами светоотдача при различных температурах окружающей среды, позволяющая сократить расходы на электроэнергию.

2.4. Основы физики индукционного разряда

В основе принципа работы безэлектродных индукционных ламп (механизм передачи мощности плазме) лежит закон электромагнитной индукции. По виткам индуктивной катушки, расположенной вблизи газоразрядной камеры и соединенной с высокочастотным генератором, протекает ток высокой частоты. Этот ток создает переменное магнитное поле, которое в свою очередь создает в разрядной камере (колбе, трубке и т.д.) вихревое высокочастотное электрическое поле. Это поле и сообщает энергию электронам, что необходимо для зажигания в колбе разряда, а затем и его поддержания.

Математическое выражение закона электромагнитной индукции:

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

Где $\partial\Phi$ - магнитный поток, проходящий через сечение S , Вб

L - длина замкнутого контура, м

$\omega = 2\pi f$ - круговая частота поля, рад/с

E - напряженность электрического поля разряда, В/м

B_m - амплитуда магнитной индукции в сердечнике, Тл

V_L - ВЧ-напряжение на контуре длиной L , В

S - сечение сердечника, м²

Рассмотрим принцип работы БИЛЛ на примере индуктивной лампы с полостью лампы (Everlight), схематический чертеж которой приведен на

рисунке 2.10.

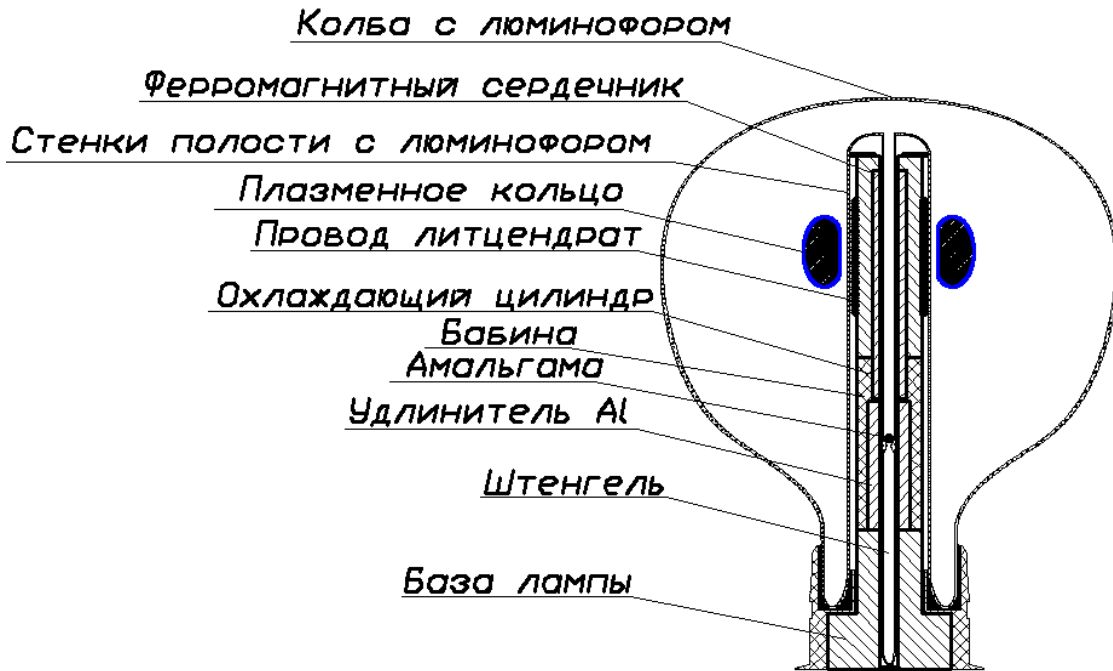


Рис. 2.10. Схематическая конструкция лампы и ее основные компоненты

Для анализа и расчета электрических характеристик индуктивного разряда было предложено использовать трансформаторную модель, которая включает в себя первичную цепь - ВЧ индуктор, состоящий из индуктивной катушки и ферромагнитного сердечника, где катушка является первичной обмоткой, а плазма является вторичной обмоткой, количество витков которой равно единице, то есть по сути индукционный разряд представляет собой замкнутый плазменный виток, индуктивно связанный с первичной обмоткой. Формула (1) дает связь между геометрическими размерами сердечника и длиной витка при известных E , B_m и ω . Из нее следует, что при постоянных значениях E и L уменьшение сечения сердечника достигается увеличением произведения B_m и ω . Однако, рост B_m и ω ведет к увеличению удельных потерь мощности в сердечнике, а следовательно, уменьшению доли мощности, поглощаемой плазмой. В то же время, для увеличения светового потока плазмы (а следовательно, ее световой отдачи) необходимо увеличение мощности, вкладываемой в плазму. Последнее достигается снижением потерь мощности в ферромагнитном сердечнике (магнитопроводе).

3. Постановка задачи

В настоящее время освещение в различных областях нашей жизни играет всё большую роль. В связи с чем возникает необходимость создания высокоэффективного источника излучения. С этой ролью наиболее всего справляются ртутные лампы низкого давления. Однако наличие внутренних электродов ограничивает как эффективность, так и срок службы данных источников. Решить эту проблему позволяет изменение способа подвода энергии в разрядную трубку: использование индукционного метода. Использование ВЧ индуктора с индуктивной катушкой позволяет обеспечить простую конструкцию лампы. Объект данной работы – БИЛЛ Matsushita Everlight 150, как и любая БИЛЛ она резко реагирует на изменения климатических условий вокруг себя. Таким образом, возникает необходимость исследования индукционного разряда в различных температурных условиях. Получив эти данные, в дальнейшем станет возможным оптимизирование конструктивных параметров лампы: ВЧ индуктора, габаритных размеров разрядной трубки, состав амальгамы и др.

Исходя из сказанного выше, задачи магистерской диссертации формулируются следующим образом:

- 1) Провести экспериментальные исследования электрических параметров БИЛЛ при варьировании температуры окружающей среды, таких как Ток катушки, Напряжение катушки, а также снятие гармонического состава тока.
- 2) Расчет потерь в сердечнике и в катушке.
- 3) Расчет параметры плазмы.
- 4) Анализ полученных результатов.

4. Экспериментальная часть

4.1. Объект исследования

Объектом исследования являлась безэлектродная индукционная лампа трансформаторного типа (рис.4.1), обладающая следующими конструктивными параметрами:

Лампа БИЛЛ рефлекторного типа Everlight 150 в комплекте с ЭПРА

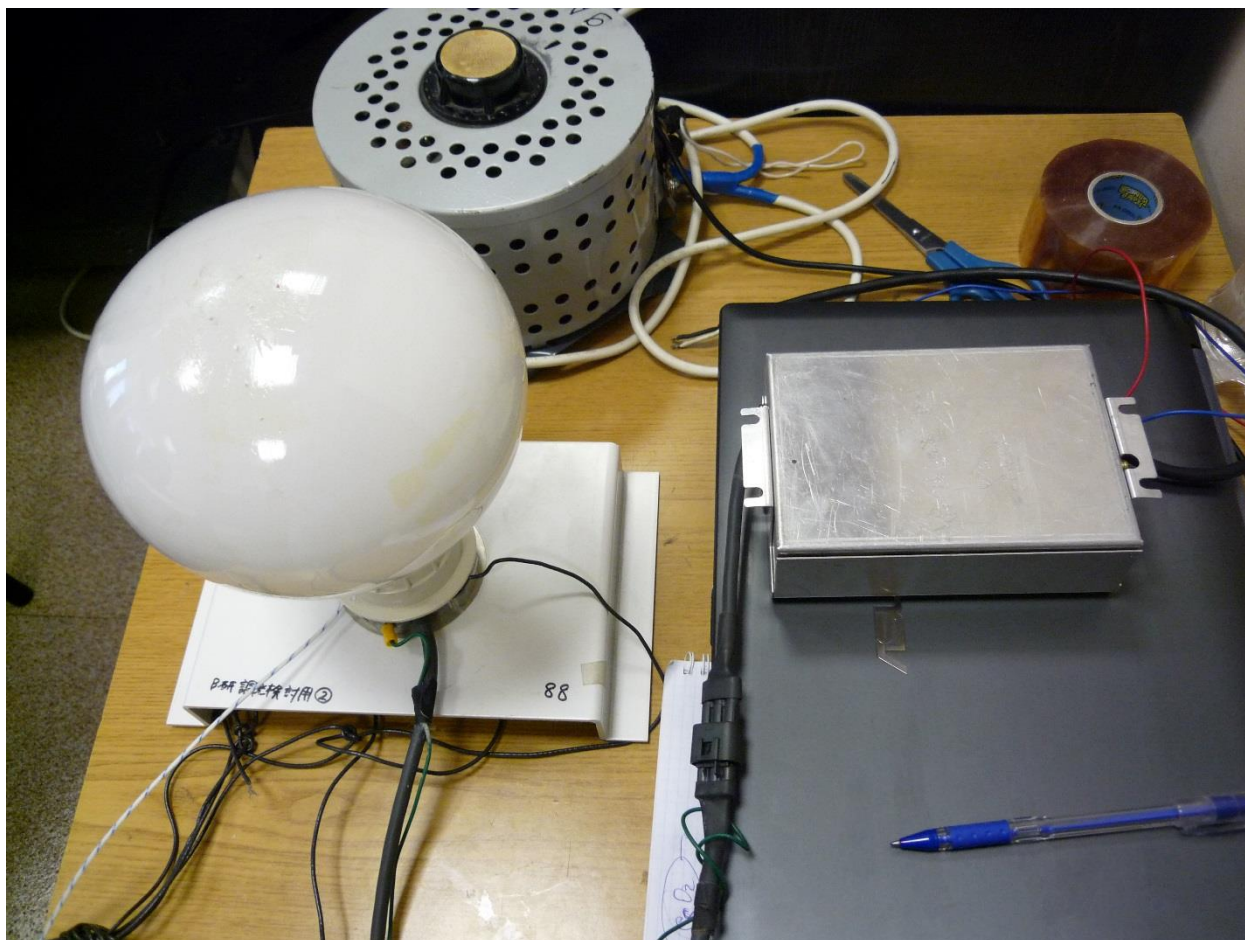


Рис. 4.1. Внешний вид комплекта лампа+ЭПРА

Каталожные характеристики ИС Everlight 150.

Спецификация

Мощность	165Вт
Входное напряжение комплекта	110В
Входной ток комплекта	1.57А
Частота индукционного разряда	135 кГц
Форма колбы (диаметр)	Рефлекторная (160 мм)
Высота лампы	200 мм
Вес лампы	260 г
Вес ЭПРА	1520 г
КПД ЭПРА	90%
Световой поток лампы (20°C) (после 100 час.) ($T_{ц} = 3100^{\circ}\text{К}$)	13300 лм
Световая отдача комплекта (20°C) (после 100 час.) ($T_{ц} = 3100^{\circ}\text{К}$)	80.6 лм/Вт
Общий индекс цветопередачи, Ra ($T_{ц} = 3100^{\circ}\text{К}$)	75
Относительный световой выход	
$T_{\text{окр.ср.}} = - 20^{\circ}\text{C}$	80%
0°C	110%
+ 25°C	100%
+ 60°C	75%
Время перезажигания	10 – 30 мсек
Время достижения 80% от устан. свет. потока	20 сек
Срок службы	60 000 часов.

Материалы компонентов лампы:

1. Лампа.

- Колба - Вольфрамовое стекло;
- Полость с откачным отростком - Пирекс (боросиликатное стекло);
- Люминофор - Смесь редкоземельных узкополосных люминофоров компании Nichia (Япония): красный (YOH: NP340-21), зеленый (LAP: NP220-106), синий (BAM: NP107-06). Для нанесения на стенки колбы и полости смесь разводится бутил ацетатом и двуокисью алюминия;
- Амальгама - Bi-In-Hg.
- Флаг для зажигания в темноте: стальная (SUS) металлическая сетка с нанесенным на ней гидратом цезия, CsOH;
- Буферный газ: аргон (0.3 мм рт.ст.).

2. ВЧ индуктор:

- Ферромагнитный сердечник - двуокись железа с добавками Mn-Zn (R-тип);
- Индуктивная катушка – провод литцендрат, марки AWG-20, 100-200кГц, (140 жил, калибр 40);
- Охлаждающее устройство: медный полый цилиндр внутри ВЧ индуктора, соединенный с алюминиевым полым цилиндром, соединенным с базой лампы.
- Диэлектрическая бобина, на которой держится катушка;
- Кабель, соединяющий катушку с ЭПРА.
- База лампы

4.2 Спецификация средств измерения.

Таблица 4.2. Спецификация средств измерения.

Тип	Производитель, название	Основные технические характеристики/диапазон измерений	Класс точности / погрешность измерения
Источник питания переменного тока	GWINSTEKAPS-9102 № EG904180	Uперем =(0-150/300) В Iперем =(0-8,4/4,2) А f =(45-500) Гц P =(0-1000) Вт	
Камера климатическая	TVB-1000/2, ГДР		
Осциллограф	GWINSTEK GDS-72102		

4.3 Методика проведения измерений и экспериментальная установка.

В силу того, что по катушке индуктивности течет высокочастотный ток, использование обычного амперметра невозможно, так как его показания будут иметь большую наводку. В связи с этим было выдвинуто несколько способов измерения тока.

- 1) Использование трансформатора тока.
- 2) Использование шунтирующего резистора.

В данной работе, в виду не столь высокой частоты генерации тока, был выбран метод номер 2, т.е. использование шунтирующего резистора. Метод номер один требует больше времени на создание самого трансформаторного кольца и дальнейшей его калибровки.

В качестве шунта был выбран резистор проволочный KNP-500 5Вт 0,1Ом

Фото 1/2 KNP-500 5 Вт, 0.1 Ом, 5%, Резистор проволочный



Рис. 4.3.1 внешний вид резистора KNP-500



Рис. 4.3.2 Источник питания переменного тока GWINSTEKAPS-9102
№ EG904180

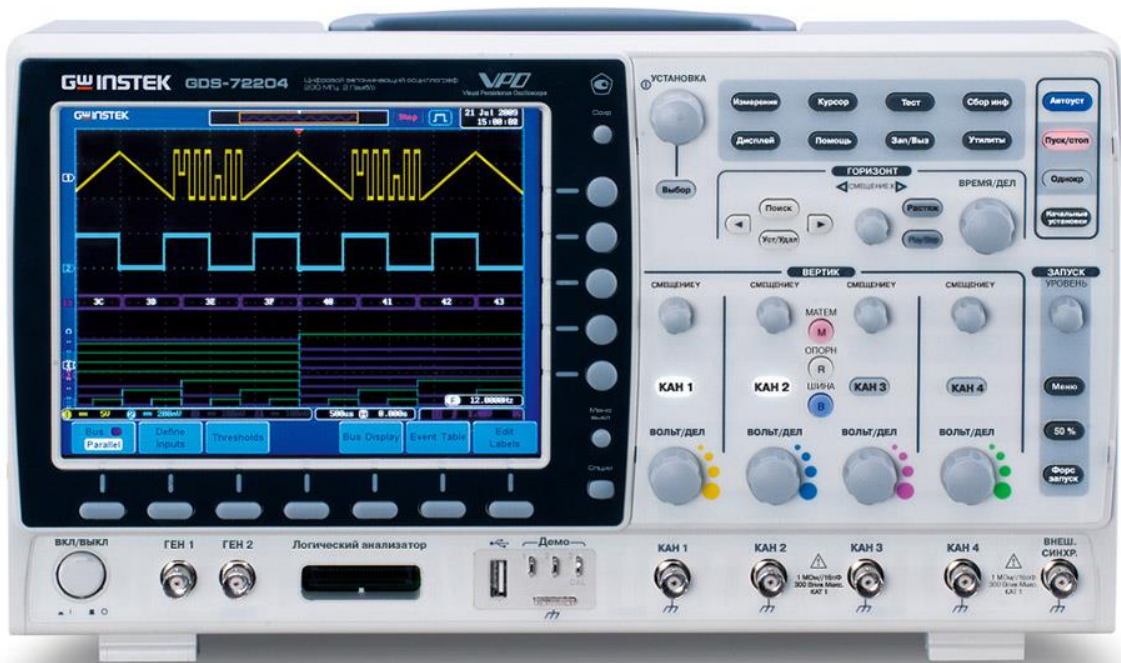


Рис. 4.3.3 Осциллограф цифровой GWINSTEK GDS-72102



Рис 4.3.4 Климатическая камера ТВV-1000/2

4.4 Метод проведения испытаний в климатической камере.

Испытание на воздействие верхнего значения температуры среды при эксплуатации (испытание 201). Испытание проводят с целью проверки способности изделий сохранять внешний вид и значения параметров в пределах, установленных в нормативных документах (далее — НД) на изделия и программах испытаний (далее — ПИ), в условиях и после воздействия верхнего значения температуры среды (далее — верхнее значение температуры при эксплуатации).

Метод испытания 201-1 — испытание изделий в камере без нагрузки, в том числе: 201-1.1 — испытание негреющихся изделий; 201-1.2 — испытание греющихся изделий; 201-2 — испытание в камере под нагрузкой греющихся изделий, в том числе: 201-2.1 — испытание в камере под нагрузкой греющихся изделий. [9]

Метод 201-2. Испытание в камере под нагрузкой греющихся изделий.

По этому методу испытывают под номинальной и (или), если указано в стандартах и ТУ на изделия и ПИ, максимально допустимой для данных изделий нагрузкой (в том числе электрической нагрузкой или током), соответствующими верхнему значению температуры внешней среды (для электрических аппаратов - при номинальной токовой нагрузке главных цепей). Характер, значение и вид нагрузки, а также (при необходимости) время нахождения изделий под нагрузкой или без нее устанавливают в стандартах и ТУ на изделия и ПИ.

Для изделий, подлежащих испытаниям по данному методу, в стандартах и ТУ на изделия и ПИ должны быть приведены данные согласно приложению Б. Должны быть приведены также тепловые характеристики монтажных приспособлений и их подробное описание, если изделия предназначены для эксплуатации со специальными монтажными приспособлениями (далее - приспособления), обеспечивающими эффективный необходимый отвод

тепла. Следует пользоваться методикой согласно ГОСТ Р 51370 (требования указаны в приложении Б, таблица Б.1).

Если в стандартах и ТУ на изделия и ПИ не указано особо, то для установки изделий в камере следует использовать приспособления, изготовленные из материалов, имеющих низкую теплопроводность.

Метод 201-2.1. Испытание в камере под нагрузкой греющихся изделий. Испытание при контроле температуры в камере

Метод применяют при выполнении одного из следующих условий:

а) камера позволяет имитировать условия свободного обмена воздуха, т.е. в камере отсутствует принудительная циркуляция воздуха и полезный объем камеры позволяет обеспечить указанные в стандартах и ТУ на изделия и ПИ минимально допустимые расстояния между испытываемыми изделиями, а также между изделиями и стенками камеры;

б) камера не позволяет имитировать условия свободного обмена воздуха, но значение превышения температуры, указанное в стандартах и ТУ на изделия и ПИ участка (узла) изделия, определенное в нормальных климатических условиях испытаний, составляет не более 25°C, а разность между указанным в стандартах и ТУ на изделия и ПИ верхним значением температуры внешней среды при эксплуатации и значением температуры для нормальных климатических условий испытаний - не более 35°C;

в) полезный объем камеры позволяет обеспечить указанные в стандартах и ТУ на изделия и ПИ минимально допустимые расстояния между испытываемыми изделиями, а также между изделиями и стенками камеры; в камере имеется принудительная циркуляция воздуха, однако охлаждающим действием ее можно пренебречь.

Допускается применение принудительной циркуляции воздуха со скоростью потока не более 2 м/с. Испытание без принудительной циркуляции воздуха является предпочтительным.

Для проведения испытания изделия размещают в камере, устанавливают режим работы, обеспечивающий требуемую нагрузку, и выдерживают в

течение времени, указанного в стандартах и ТУ на изделия и ПИ. Затем значение температуры в камере повышают до верхнего значения температуры при эксплуатации и выдерживают изделия при этой температуре в течение времени, достаточного для достижения теплового равновесия. Время выдержки указывают в стандартах и ТУ на изделия и ПИ. Допускается подъем температуры в камере и включение изделий под нагрузку производить одновременно. [9]

4.5 Проведение испытаний в климатической камере

Испытания были проведены по следующей схеме:

- 1) Включение климатической камеры, «прогрев»
- 2) Проверка положения измерительных приборов и стойки с лампой
- 3) Выход на заданную для испытаний температуру
- 4) Выдержка лампы 2 часа при установившейся температуре
- 5) Включение лампы, проведение измерений

Схема измерения характеристик лампы при различных температурах окружающей среды приведена ниже (Рис. 4.5.1).

Стойка для лампы и лампа должны находиться в неизменном положении относительно термокамеры при каждом измерении. Возникла проблема невозможности закрепления стойки лампы на одном месте на продолжительное время. Для решения задачи на внутреннюю поверхность климатической камеры были нанесены отметки, позволяющие определить местоположение стойки с лампой и при каждом измерении устанавливать её на одно и то же место

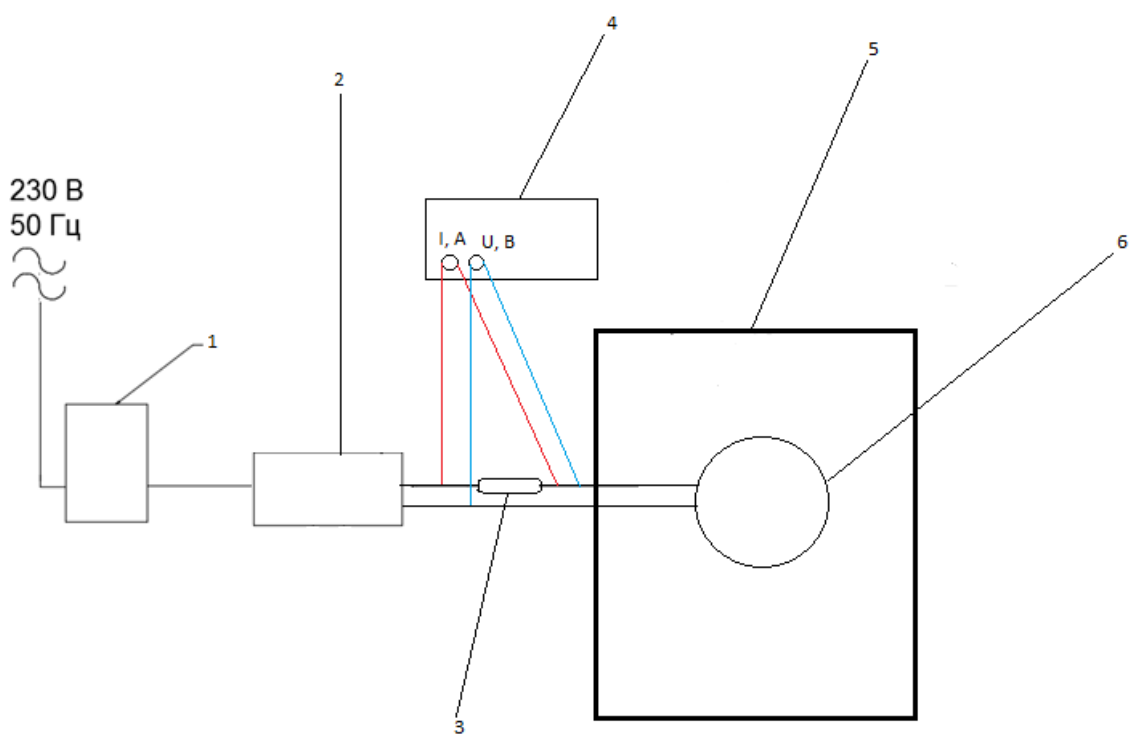


Рис. 4.5.1 Принципиальная схема измерения характеристик лампы при различных температурах окружающей среды. 1 - Источник питания переменного тока GWINSTEKAPS-9102 № EG904180, 2 - ЭПРА 3- Шунтирующий резистор, 4 - Осциллограф GWINSTEK GDS-72102, 5- климатическая камера, 6- Испытуемая лампа.

4.6 Погрешности измерений

В данном разделе приведены основные источники систематических погрешностей и их оценка, а также методика оценки случайных погрешностей.

К систематическим относятся инструментальные погрешности, которые вносятся средствами измерений. В данной работе применялся один измерительный прибор: осциллограф GWINSTEK GDS72102.

Цифровой осциллограф GWINSTEK GDS-72102 имеет погрешность 3% по вертикальной шкале. По шкале времени ошибка не превышает 110 пс.

Случайная погрешность определялась по методике [10]. По формуле (4.6.1) рассчитывается среднее значение измеряемой величины, а по формуле (4.6.2) СКО отдельного результата.

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N} \quad (4.6.1)$$

$$S_x = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (4.6.2)$$

где i – номер измерения, N – число измерений.

Далее вычисляется нормированное отклонение:

$$t_M = \frac{|x_i - \bar{x}|_{max}}{S_x} \quad (4.6.3)$$

Полученное значение нормированного отклонения сравнивается с теоретическим, по результату сравнения отбрасываются промахи. Далее рассчитывается СКО измеряемой величины:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{N}} \quad (4.6.4)$$

$$S_{\bar{y}} \approx \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_j} \Big|_{x_j = \bar{x}_j} \right)^2 \cdot S_{\bar{x}_j}^2} \quad (4.6.5)$$

где $S_{\bar{x}_j}$ считается по формуле (4.6.4), j – определяющий фактор, n – число определяющих факторов.

Общая погрешность измерений определяется систематической и случайной погрешностями. В общем случае суммарное отклонение записывается в виде:

$$y = \bar{y} \pm t_{\Sigma} S_{\Sigma} \quad (4.6.6)$$

где t_{Σ} определяется по эмпирической формуле (4.6.8), а S_{Σ} – по формуле (4.6.9).

$$t_{\Sigma} = \frac{\theta + (t_{p,n})_{\bar{y}} S_{\bar{y}}}{S_{\theta} + S_{\bar{y}}} \quad (4.6.8)$$

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\theta}^2 + S_{\bar{y}}^2} \quad (4.6.9)$$

где $(t_{p,n})_{\bar{y}}$ – нормированное отклонение по распределению Стьюдента для измеряемой величины, S_{θ}^2 считается как:

$$S_{\theta}^2 = \sum_{j=1}^n S_{\theta_j}^2 \quad (4.6.10)$$

5. Результаты экспериментальных исследований

5.1 Расчет для нормальных климатических условий

В разделе 5.2 в Таблицах 5.2.1, 5.2.2 приведены результаты измерений электрических характеристик исследованной лампы. В данной таблице также приведены погрешности измерений. Все измерения проводились для неизменного положения лампы и только после ее выхода на режим.

5.1.1 Осциллограммы тока и напряжения катушки

Осциллограмма кривых формы напряжения и тока катушки при нормальных условиях изображена на рис. 5.1.1

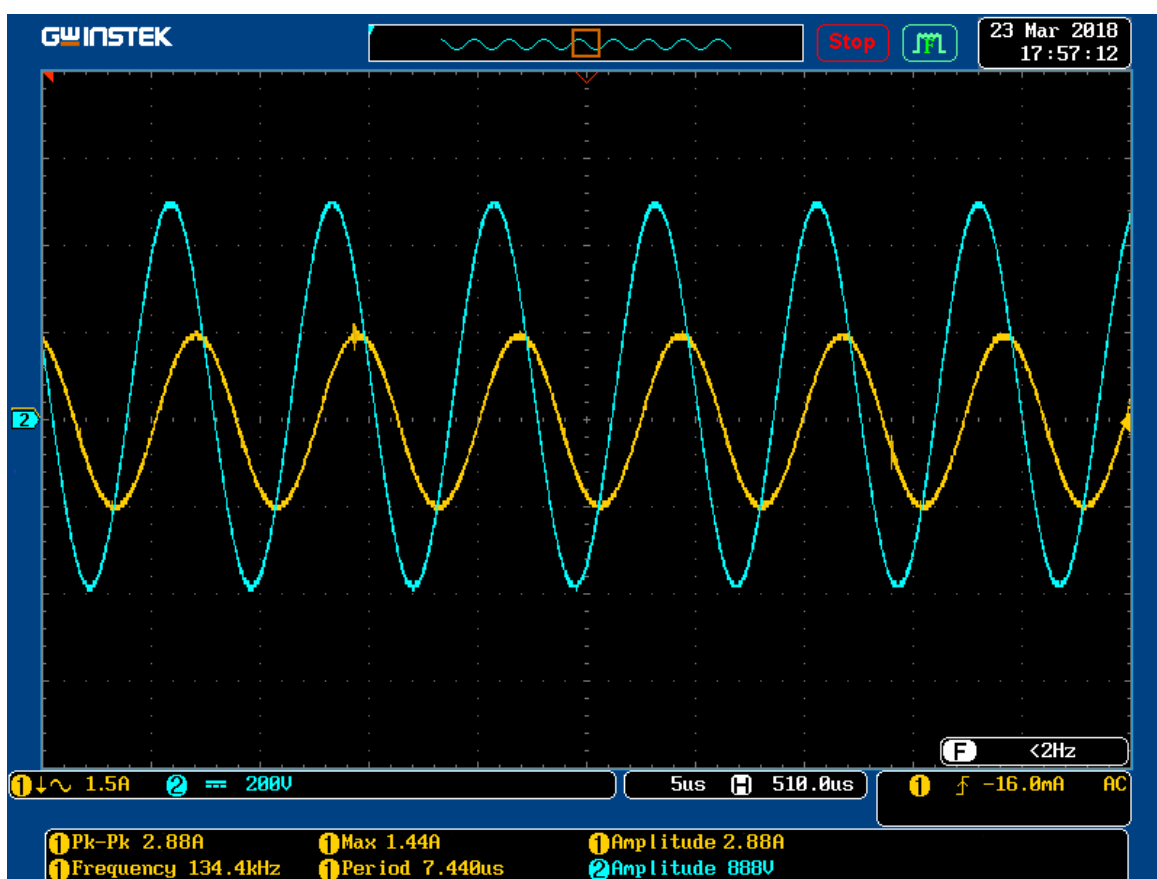


рис. 5.1.1 Осциллограммы кривых тока и напряжения катушки

$$I_{ампл} = 1,44 A$$

$$I_{дейст} = \frac{I_{ампл}}{\sqrt{2}} = 1,02 A$$

$$V_{ампл} = 444 B$$

$$V_{дейст} = \frac{V_{ампл}}{\sqrt{2}} = 313,9 B$$

5.1.2 Расчет электрических параметров:

ВЧ напряжение на плазменном витке, V_{pl} , рассчитывается как:

$$V_{pl} = I_c \cdot \omega \cdot M \quad (5.2.1)$$

Где M - взаимная индуктивность ВЧ индуктора и плазменного витка:

$$M = k \sqrt{L_{инд} L_{пл}} \quad (5.2.2)$$

Коэффициент k характеризующий связь катушки с индуктивной плазмой, определяющийся геометрией разрядного промежутка, конструкцией катушки и ферромагнитного сердечника, пространственным распределением напряженности ВЧ электрического поля E_{pl} и плотности индукционной плазмы. В лампе Everlight 150, $k = 0,8$ [6]. $L_{пл}$ – индуктивность плазменного витка. $L_{инд} = 400 \cdot 10^{-6}$ Гн – индуктивность индуктора.

$$L_{пл} = L_{инд} / k N^2 \quad (5.2.3)$$

Исходя из формул (5.2.2) и (5.2.3), подставив их в (5.2.1), получаем:

$$V_{pl} = I_c \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot k \cdot \sqrt{L_{инд} \cdot L_{пл}} = 7,725 B$$

Усредненная по сечению плазмы напряженность ВЧ электрического поля в плазме, E_{pl} :

$$E_{pl} = V_{pl} / \Lambda_{pl} \quad (5.2.2),$$

где Λ_{pl} - длина плазменного витка.

$$\Lambda_{pl} = D_{pl} \cdot \pi \quad (5.2.3)$$

где D_{pl} - диаметр плазменного витка.

При расчете диаметра плазмы предполагаем, что максимум плотности разрядного промежутка смещена к стенке полости и расположен на

расстоянии 0,8 мм от нее. Тогда диаметр плазменного витка рассчитывается как (5.2.4)

$$D_{pl} = D_{\text{полости}} + 2 \cdot 0.8 = 4.6 \text{ см} \quad (5.2.4)$$

Подставляя (5.2.4) в (5.2.3), получаем

$$\Lambda_{pl} = D_{pl} \cdot \pi = 4.6 \cdot \pi = 14.45 \text{ см}$$

Следовательно

$$E_{pl} = \frac{V_{pl}}{\Lambda_{pl}} = \frac{7.01}{14.45} = 0.535 \text{ В/см}$$

5.1.3 Расчет потерь в ферритовом сердечнике.

Определим сечение сердечника, рассчитываемое с учетом внутреннего диаметра сердечника $ID_{fer}=1$ см, системы охлаждения в ВЧ индукторе и пространства, где содержится штенгель.

$$S_{fer} = \frac{\pi \cdot D_{fer}^2}{4} - \frac{\pi \cdot ID_{fer}^2}{4} = 2.01 \text{ см} \quad (5.3.1)$$

Индукция магнитного поля:

$$B_m = \frac{10^8 \cdot V_c}{4.4 \cdot N \cdot S_{fer} \cdot f} = 657.4 \text{ Тл} \quad (5.3.2)$$

И тогда, удельные (в 1 см^3) потери мощности в сердечнике при температуре 80°C рассчитываются по формуле (5.3.3):

$$P_{fer} = \frac{P}{V_{fer}} = a \cdot f^b \cdot B^c \quad (5.3.3)$$

где b и c - показатели степени, зависящие от сорта ферромагнетиков и частоты ВЧ поля, a - размерный коэффициент, зависящий от сорта и температуры ферромагнетика.

Тип	A	B	c
K	0.053	1.6	3.15
R	0.036	1.64	2.68
P	0.0434	1.63	2.62
F	0.0573	1.66	2.68

Табл. 5.1.3 Коэффициент и показатели степени для для различных ферромагнетиков на частоте 135 кГц.

Выбор марки феррита обусловлен не только минимальными удельными потерями мощности при комнатной температуре, но потерями мощности при рабочей температуре сердечника. В общем случае, температура сердечника зависит от места его расположения, структуры и теплопроводности охлаждающего ВЧ индуктор устройства, размеров сердечника, расположения и формы индукционной плазмы, рабочей мощности лампы.

Температурный режим работы лампы должен быть таков, чтобы при самых высоких температурах окружающей среды (обычно, $T_{o.c. \max} = +60^{\circ}\text{C}$) рабочая температура сердечника была ниже температуры точки Кюри T_{Curie} , при которой феррит теряет свои магнитные свойства.

Ферромагнетиком для сердечика в нашей лампе будет рассматриваться ферромагнетик R-типа. Он имеет самые низкие среди остальных рассматриваемых ферромагнетиков удельные потери мощности в районе рабочих температур (от $+90$ до $+150^{\circ}\text{C}$).

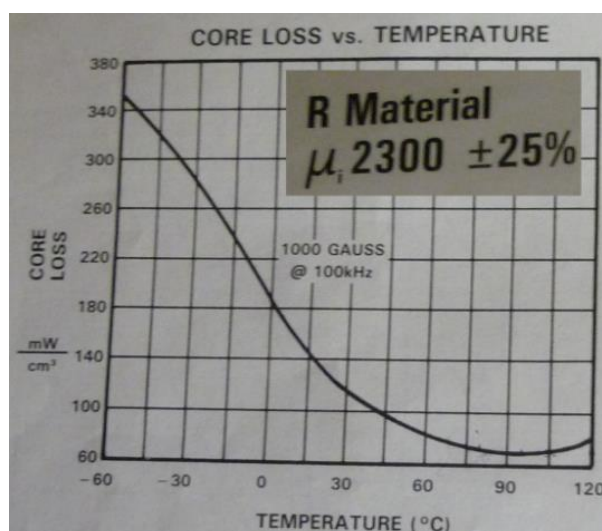


Рис 5.1.3 Зависимость удельных потерь ферромагнетика R типа в зависимости от температуры

Исходя из вышесказанного формула (5.3.3) приобретает вид:

$$P_{fer.ob} = 0.036 \cdot (f \cdot 10^{-3})^{1.64} \cdot (B_m \cdot 10^{-3})^{2.68}$$

$$P_{fer.ob} = 36.46 Bm / m^3$$

Рассчитаем объем сердечника, который будет определяться из высоты ферромагнетика $H_{fer} = 7 \text{ см}$:

$$V_{fer} = \frac{\pi \cdot H_{fer} \cdot D_{fer}^2}{4} - \frac{\pi \cdot H_{fer} \cdot ID_{fer}^2}{4} \quad (5.3.4)$$

$$V_{fer} = 14.07 \text{ см}^3$$

И тогда, определяем потери мощности в сердечнике ВЧ индуктора:

$$P_{fer} = P_{fer.ob} \cdot V_{fer}$$

$$P_{fer} = 512.75 \text{ мВт}$$

Рассчитанные потери мощности в сердечнике при $T_{fer} = 80^\circ\text{C}$ сравнительно низки. Однако, при реальной рабочей температуре $+150^\circ\text{C}$ они должны быть выше. Оценив потери в сердечнике при $T_{fer} = +150^\circ\text{C}$ $P_{fer}/V_{fer} = 140 \text{ мВт/см}^3$ и умножив их на объем сердечника получаем:

$$P_{fer} = 1961.7 \text{ мВт} \approx 2 \text{ Вт.}$$

5.1.4 Расчет потери мощности в проводе катушки:

Индуктивная катушка представляет собой спираль из многожильного изолированного провода литцендрат, (калибр 40) с 19-ти жилами и имеющего на частоте ВЧ поля 135 кГц на рабочей температуре провода $T_{coil} = +150^\circ\text{C}$ удельное сопротивление $\rho = 2 \times 10^{-3} \text{ Ом/см}$. Катушка размещена на ферромагнитном сердечнике и отделена от стенок полости диэлектрической бобиной [12]. Потери в катушке вызваны следующими причинами:

а) Провода обмотки обладают омическим сопротивлением;

б) Сопротивление провода обмотки переменному току возрастает с ростом частоты, что обусловлено скин-эффектом, суть которого состоит в том, что ток протекает не по всему сечению проводника, а по кольцевой части поперечного сечения.

$P_c = R_c \cdot I_c^2$, где R_c - сопротивление катушки, I_c - ток катушки.

$$R_c = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{\rho \cdot N \cdot D_{fer}}{\pi \cdot r^2} \quad (5.4.1)$$

$$R_c = 0.50 \text{ Ом}$$

Можно рассчитать потери в катушке:

$$P_c = I_c^2 \cdot R_c \quad (5.4.2)$$

$$P_{coil} = 0.52 \text{ Вт}$$

Общие потери на ВЧ индукторе будут складываться из:

$$P_c = P_{coil} + P_{fer} \quad (5.4.3)$$

$$P_c = 0.53 + 0.512 = 1.043 \text{ Вт}$$

Рассчитаем потери с учетом температурного режима ВЧ индуктора при +150 °С, о чем упоминалось выше, из (5.4.3) следует:

$$P_c = 2,53 \text{ Вт}$$

В соответствии с трансформаторной моделью индукционного разряда $I_{пл}$ можно рассчитать по формуле:

$$I_{пл} = \frac{P_l - P_{инд}}{V_{пл} \cos \varphi} \quad (5.5.1)$$

P_l – потребляемая лампой мощность; $P_{инд}$ – потери мощности в индукторе, определяемые из данных рис. 4.11; φ – сдвиг фаз между напряжением и током плазмы. $V_{пл}$ – напряжение плазменного витка.

$$\cos \varphi = \frac{R_{пл}}{Z_{пл}} \quad (5.5.2)$$

$$Z_{пл} = \sqrt{R_{пл}^2 + (\omega L_{пл})^2} \quad (5.5.3)$$

где $Z_{пл}$ – полное сопротивление плазмы, $R_{пл}$ – активное сопротивление плазмы, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота тока, $L_{пл}$ – индуктивность плазменного витка.

Активное сопротивление плазмы находится из полного сопротивления плазмы и индуктивности плазменного витка:

$$R_{пл} = \sqrt{Z_{пл}^2 - (\omega L_{пл})^2} \quad (5.5.4)$$

Полное сопротивление плазмы определим по известным напряжению плазменного витка и мощности плазмы:

$$Z_{пл} = \frac{U_{пл}^2}{P_{пл}} = \frac{U_{пл}^2}{P_{л-Р_{инд}}} \quad (5.5.5)$$

Индуктивность плазменного витка можно найти, зная взаимную индуктивность ВЧ индуктора и плазменного витка:

$$M = k\sqrt{L_{инд}L_{пл}} \quad (5.5.6)$$

где $k \approx 0,8$ – коэффициент связи индуктора с плазменным витком, $L_{инд} = 400 \cdot 10^{-6}$ Гн – индуктивность индуктора.

Взаимная индуктивность ВЧ индуктора и плазменного витка определяется по формуле [3]:

$$M = \frac{U_{пл}}{I_{инд}\omega} \quad (5.5.7)$$

где $I_{инд}$ – ток в индукторе.

Из формул (5.5.6) и (5.5.7) находим индуктивность плазменного витка:

$$L_{пл} = \frac{M^2}{L_{кат}} = \frac{U_{пл}^2}{(I_{инд}\omega)^2 L_{инд}} \quad (5.5.8)$$

Подставив формулы (5.5.2-5.5.8) в (5.5.1) можно получить формулу расчёта тока плазмы по трансформаторной модели:

$$I_{пл} = \frac{1}{\frac{kVd}{N} \sqrt{\left(\frac{1}{P_{л-Р_{инд}}}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{I_{инд}^2 \omega^2 L_{инд}}\right)^2}} \quad (5.5.9)$$

$$I_{пл} = 21.65 \text{ A}$$

Далее, необходимо найти мощность плазмы, по уже рассчитанным значения тока плазмы $I_{пл}$ и напряжению плазменного витка V_{pl} :

$$P_{pl} = I_{pl} \cdot V_{pl} \quad (5.5.10)$$

$$P_{pl} = 151.98 \text{ Вт}$$

5.1.5 Гармонический состав тока:

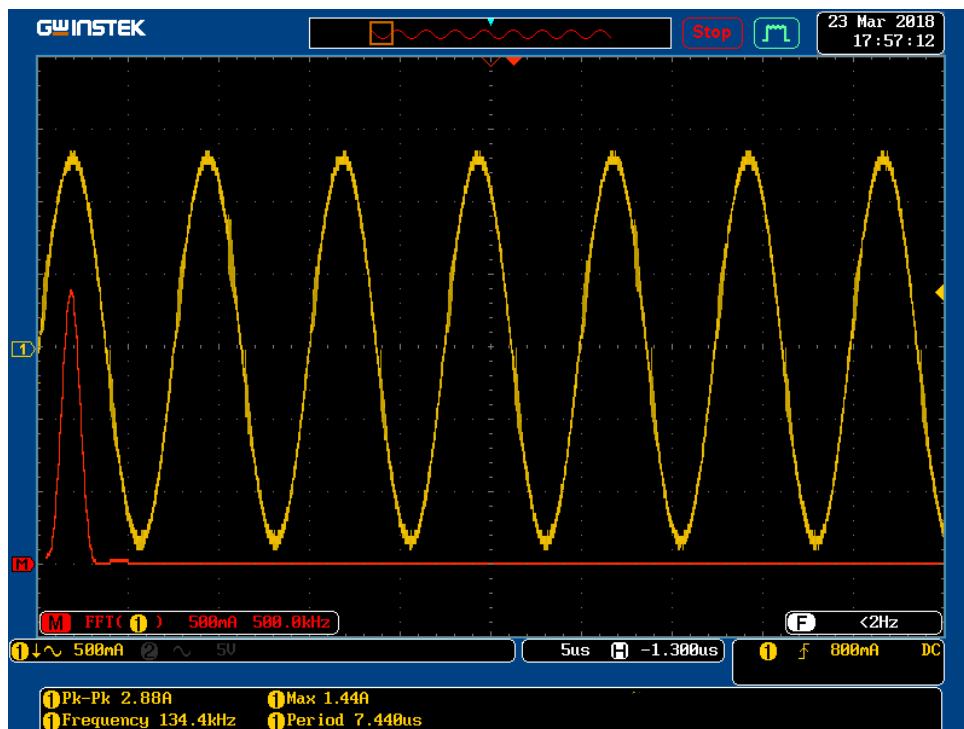


Рис. 5.1.5 Гармонический состав тока (красная кривая)

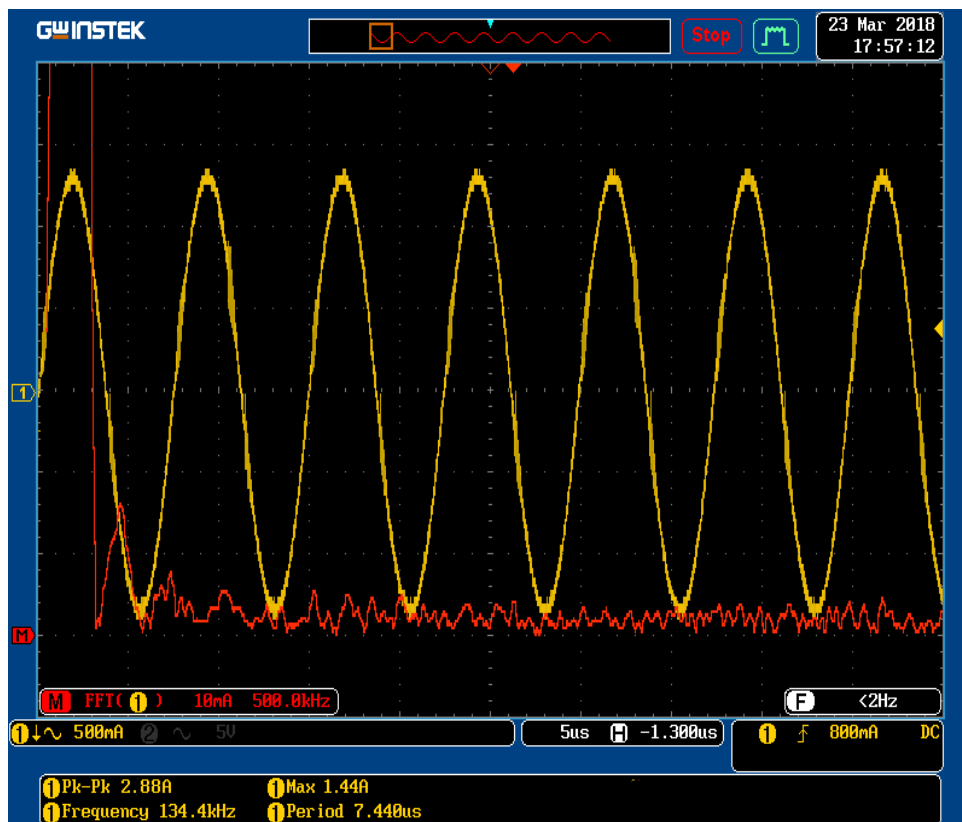


Рис. 5.1.5* Гармонический состав тока в масштабе

В соответствии с ГОСТ 30804.3.2-2013 (IEC 61000-3-2:2009) Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами [11], световое оборудование относится к классу С с потребляемой мощностью более 25Вт.

Эмиссия гармоник должна укладываться в требования представленные в таблице 5.1.5:

Порядок гармонической составляющей n	Максимальное допустимое значение гармонической составляющей тока, % от основной гармонической составляющей потребляемого тока
2	2
3	$30 \cdot \lambda^*$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$ (только для нечетных гармонических составляющих)	3
* Коэффициент мощности цепи.	

Таблица 5.1.5 Нормы гармонических составляющих тока для ТС класса С

Пик 1ой гармоники тока, исходя из Рис: $I_1 = 1.8A$

Пик 2ой гармоники тока, исходя из Рис: $I_2 = 15mA$

Тогда процентная составляющая 2ой гармоники от 1ой: $\frac{I_2}{I_1} \cdot 100\% = 0.8\%$

Таблица 5.1.5* Нормы гармонических составляющих тока для ТС класса С
И рассчитанные значения.

Порядок гармонической составляющей n	Максимальное допустимое значение гармонической составляющей тока, % от основной гармонической составляющей потребляемой тока	Рассчитанный % от основной гармонической составляющей потребляемой тока
2	2	0.81
3	$30 \cdot \lambda$	0.44
5	10	0.27
7	7	0.25
9	5	0.25
$11 \leq n \leq 9$	3	0.25

λ - коэффициент мощности лампы, рассчитываемый следующим образом:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \text{ где } P - \text{ активная мощность; } S - \text{ полная мощность;}$$

Q - реактивная мощность.

$$\lambda = 0.71$$

Либо же можно было рассчитать иначе, взглянув на осциллограмму тока и напряжения. В ней, угол сдвига фаз м/у ними равен примерно 45 градусам.

5.2 Результаты измерений для диапазона температур от -20°C до $+60^{\circ}\text{C}$

В данном разделе приведены результаты измерений для 7 различных температур окружающей среды, а именно: -20°C ; -10°C ; 0°C ; 10°C ; 40°C ; 50°C ; 60°C . Осциллограммы токов и напряжений для каждой из температур приведены в приложении 1.

Результаты расчетов представлены в таблице 5.2.

$T_{\text{окр}}, ^{\circ}\text{C}$	$I_{\text{д}}, \text{A}$	$V_{\text{д}}, \text{B}$	$E_{\text{пл}}, \text{B/cm}$	$V_{\text{пл}}, \text{B}$	$I_{\text{пл}}, \text{A}$	$P_{\text{fer}}, \text{Bm}$	$P_{\text{с}}, \text{Bm}$	$P_{\text{пл}}, \text{Bm}$	$\Phi_{\text{v}}, \text{ЛМ}$
-20	0.11±0.001	63.6±1.3	0.05±0.001	0.77±0.01	2.77±0.14	1.41±0.07	1.41±0.07	2.13±0.12	2123
-10	0.22±0.001	69.3±1.6	0.11±0.001	1.67±0.07	11.84±0.59	1.47±0.09	1.50±0.09	19.77±0.9	3942
0	0.45±0.001	118.8±3.1	0.23±0.002	3.43±0.13	23.52±1.18	1.69±0.08	1.79±0.08	80.67±1.2	7901
10	0.58±0.001	183.1±3.8	0.30±0.002	4.43±0.20	24.88±1.23	1.83±0.09	2.00±0.09	110.21±1.8	9789
25	1.02±0.04	313.9±4.7	0.49±0.002	7.01±0.33	21.65±1.21	1.97±0.1	2.49±0.11	151.98±2.5	12454
40	1.17±0.06	322.4±4.8	0.50±0.002	7.21±0.34	21.75±1.19	2.11±0.1	2.79±0.11	156.81±2.6	11741
50	1.09±0.05	296.9±4.5	0.51±0.002	6.64±0.31	23.28±1.18	2.25±0.11	2.84±0.11	154.60±2.7	11362
60	1.28±0.06	277.2±4.5	0.42±0.002	6.19±0.32	24.57±1.20	2.56±0.11	3.38±0.13	152.28±2.6	10838

Таблица 5.2.1 Результаты расчетов электрических характеристик лампы и внутренних параметров плазмы.

В таблицу 5.2.1 добавлены значения светового потока лампы в зависимости от температуры окружающей среды, полученные в работе [12]. Это необходимо для того, чтобы соотнести изменение электрических и светотехнических характеристик.

Таблица 5.2.2 Нормы гармонических составляющих тока для ТС класса С
И рассчитанные значения для различных $T_{окр}$.

$T_{окр}, ^\circ C$	Порядок гармонической составляющей n	Максимальное допустимое значение гармонической составляющей тока, % от основной гармонической составляющей потребляемой тока	Рассчитанный % от основной гармонической составляющей потребляемой тока
-20	2	2	<1
-10			<1
0			<1
10			<1
25			0.81
40			1.12
50			1.13
60			1.40
-20	3	$30 \cdot \lambda$	<1
-10			<1
0			<1
10			<1
25			0.44
40			0.92
50			0.95
60			1.05

6. Анализ полученных результатов

На Рисунке 6.1 приведены зависимости Тока катушки и напряжения катушки в зависимости от температуры окружающей среды.

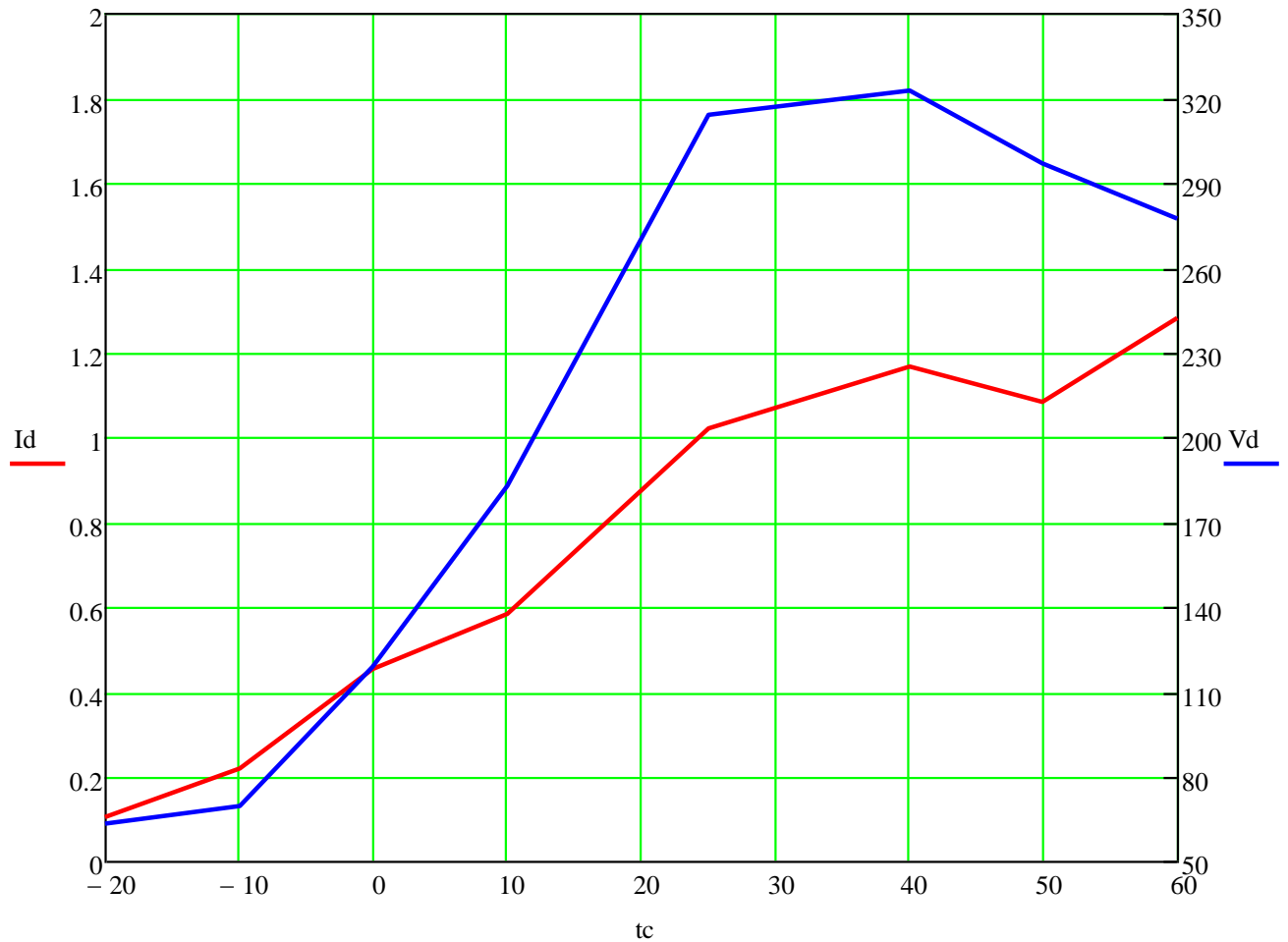


Рис.6.1 Зависимость тока и напряжения катушки от температуры окружающей среды

На Рисунке 6.2 приведены зависимости тока и напряжения плазмы в зависимости от температуры окружающей среды.

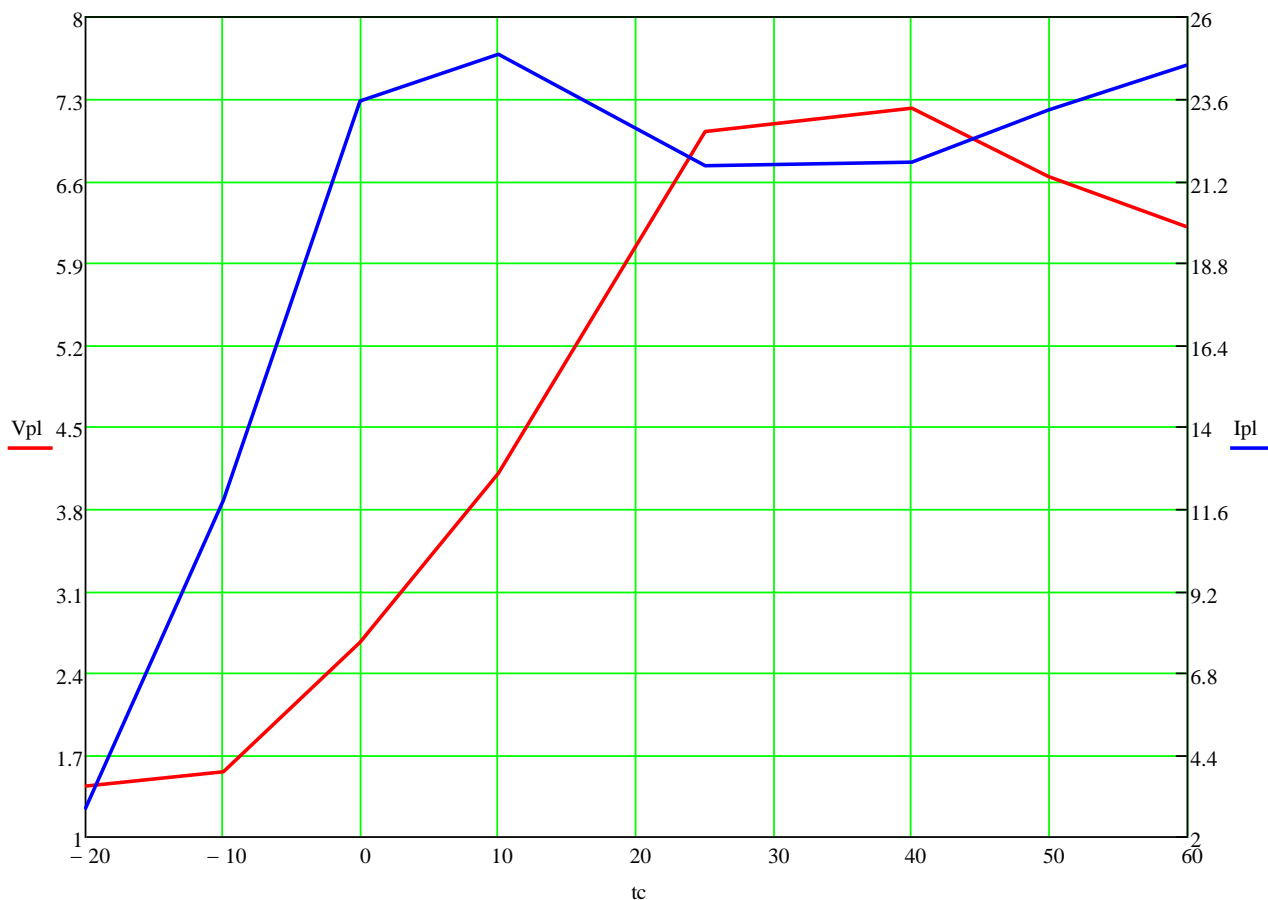


Рис. 6.2 Зависимость напряжения и тока плазмы от температуры окружающей среды

По полученным результатам на Рис. 6.1 видно, что при отрицательной температуре окружающей среды, ток и напряжение катушки снижаются относительно номинальных величин (при $T_{окр} = 25^{\circ}\text{C}$) более чем в 5 раз. При $T_{окр}$ более 25°C , наоборот, происходит увеличение тока и напряжения.

Это обусловлено рассогласованием в работе лампы, т.е. снижением внутренних параметров, таких как напряжение и ток плазмы. Низкий ток порождает малое выделение тепла на обмотке, а значит и амальгама греется слабее. Вследствие этого парциальное давление паров ртути меняется.

На рисунке 6.3 изображены зависимости изменения мощности плазмы и светового потока лампы в относительных единицах. Видно, что кривые совпадают по форме, однако есть несколько интересных моментов.

В области высоких температур, мощность плазмы практически соответствует номинальной, в то время как световой поток падает. Из этого можно сделать вывод о том, что в области температур свыше 30°C в большей степени на эффективность лампы оказывает влияние изменение парциального давления ртути. В области ниже 25°C наблюдается обратная ситуация, здесь, кривая мощности плазмы лежит ниже кривой потока. Исходя из сказанного выше и из того, что изменение температуры окружающей среды в основном сказывается на двух параметрах лампы: это парциальное давление ртути и мощность плазмы, можно сделать вывод о том на какой из параметров в большей степени влияет та или иная температура.

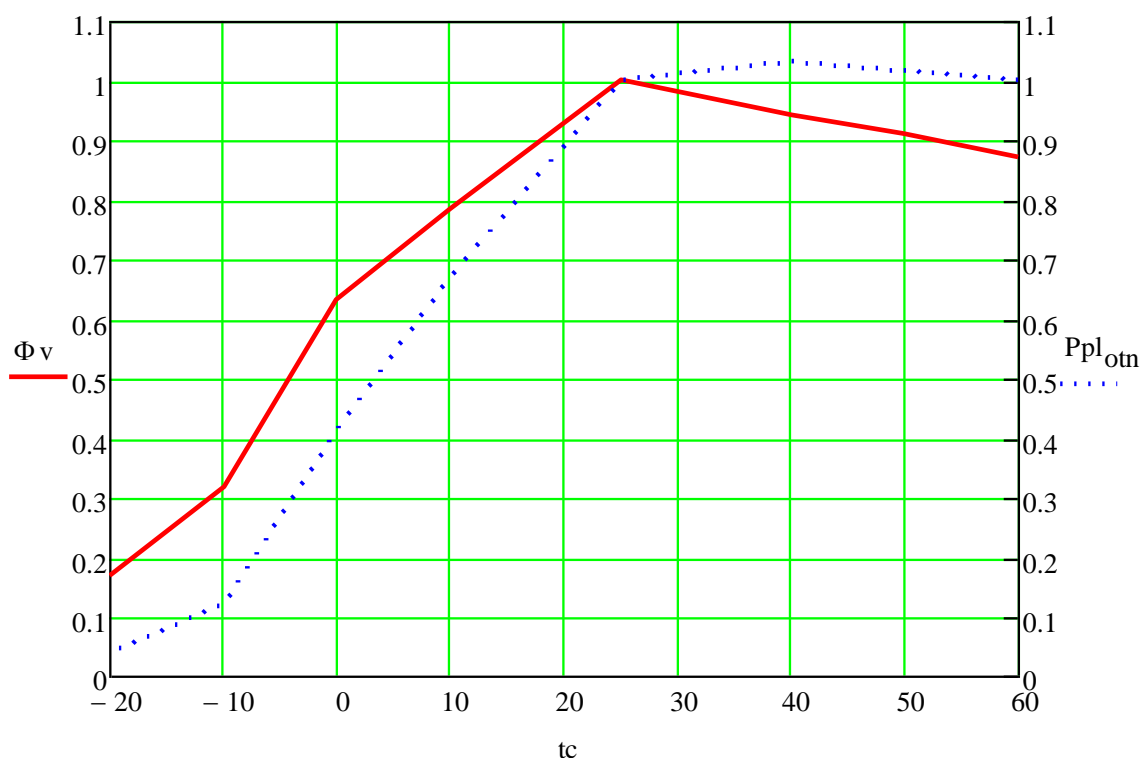


Рисунок 6.3 Зависимости мощности плазмы и светового потока в относительных единицах, в зависимости от Токр

На рисунке 6.4 изображены зависимости потерь в сердечнике P_{ferREAL} , в катушке P_{coil} и суммарные потери в индукторе P_{sum} .

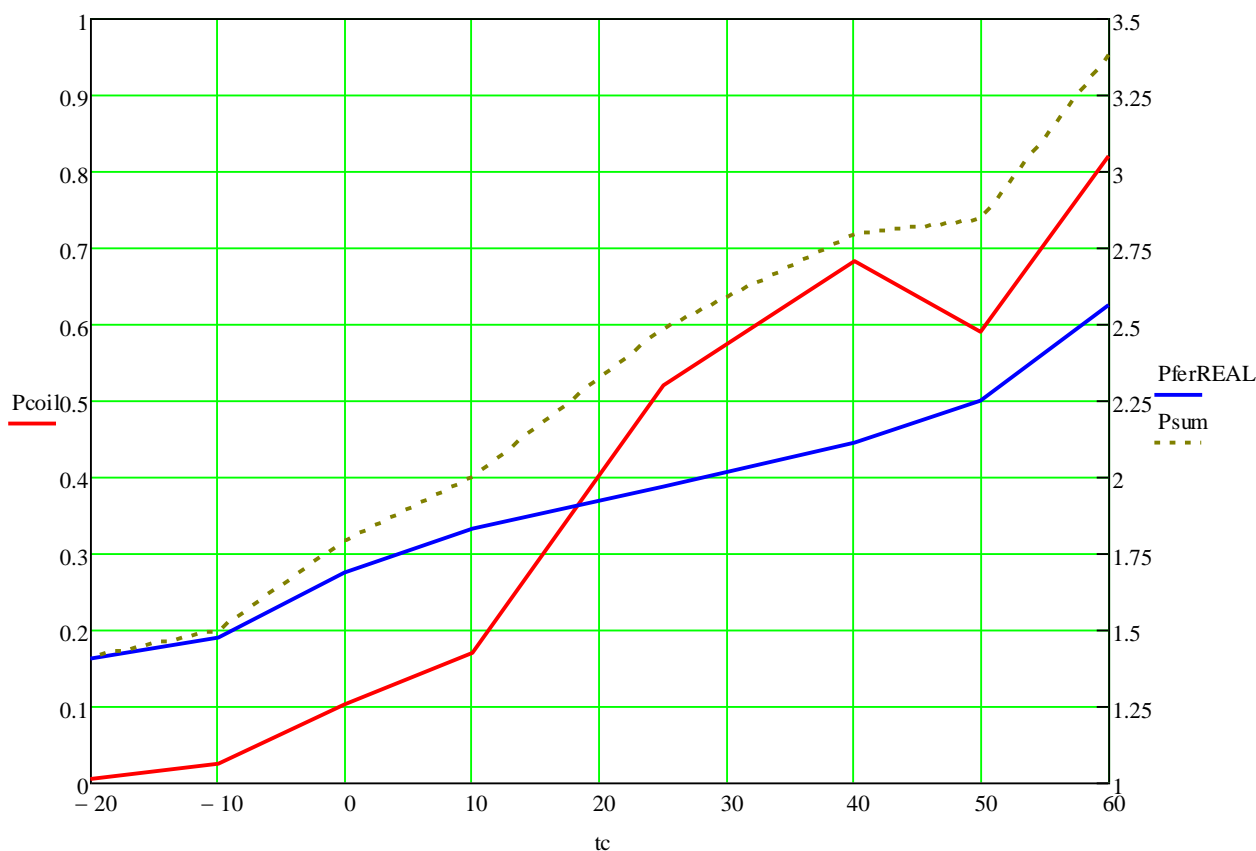


Рис. 6.4 Потери в феррите, катушке и суммарные потери

Каких-то заметных результатов получено не было, очевидно, при низких температурах окружающей среды, потери в феррите падают в виду их зависимости от величины магнитной индукции, которая в свою очередь уменьшается с уменьшением напряжения на катушке. Обратная ситуация наблюдается для высоких температур. Что касается потерь в катушке, то они изменяются пропорционально квадрату тока через катушку и, их величина изменяется сильно. Тем не менее, сам по себе вклад этих потерь в общую картину невелик, так как их значение колеблется на уровне от десятой доли ватта до нескольких единиц, что по сравнению с общей мощностью лампы, есть ничто.

7. Заключение

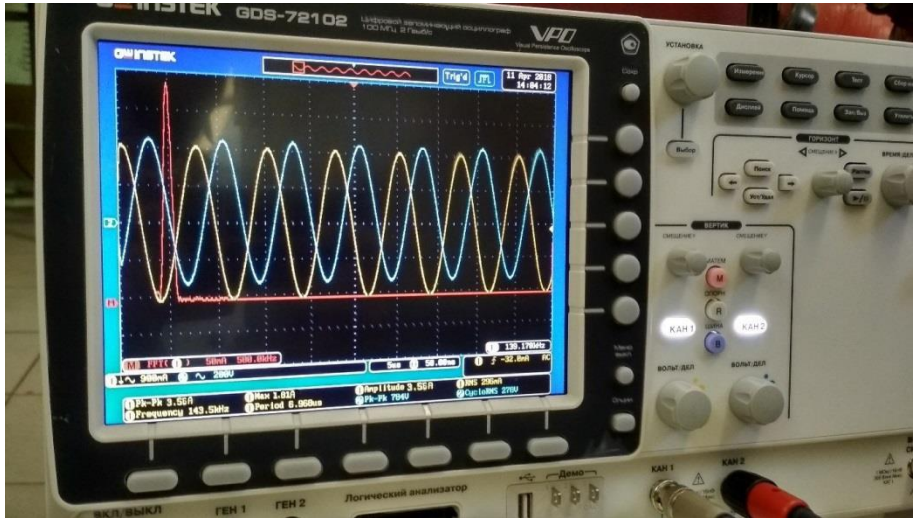
В работе были проведены исследования электрических характеристик лампы рефлекторного типа с полостью, под влияние различной температуры окружающей среды. Основные результаты и выводы исследования следующие:

1. Исследования показали, что понижение отрицательной температуры окружающей среды ниже комнатной приводит к уменьшению давления паров ртути, что вызывает изменение параметров плазмы - напряженности ВЧ электрического поля и плотности плазмы (разрядного тока). В результате происходит рассогласование генератора ВЧ мощности с индукционным разрядом лампы, что вызывает уменьшение поглощаемой плазмой мощности, а с ней тока и напряжения катушки.
2. Полученный гармонический состав тока при варьировании $T_{окр}$ не выходит за рамки, установленные ГОСТ.
3. Рассчитанные значения мощности плазмы и их изменение при различной $T_{окр}$ коррелируют с изменением световых характеристик лампы.
4. Мощность потерь в индукторе в интервале рабочих температур окружающей среды $T_{окр}$ не превышает 5% от мощности лампы и практически не влияет на ее электрические и световые характеристики.

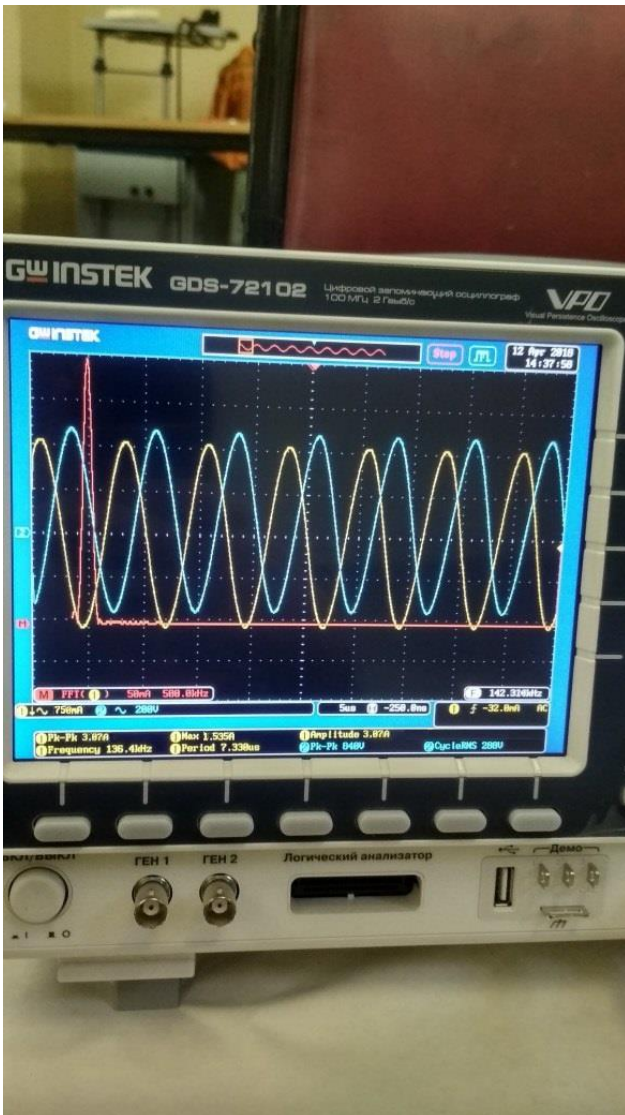
Список литературы

1. J. Bethenod et al. US patent 2,030,957. Feb.18, 1936
2. J.M. Anderson. J.Illum.Eng.Soc.. 1968, v.64. p.236
3. V. A. Godyak, B. Alexandrovich, R. B. Piejak. US Patent 5,834,905. Nov. 11. 1998
4. J. J. Anderson. General Electric Report № 83CRD039. Feb. 1983
5. Schlejen, Proc. 1992.
6. О.А. Попов. Исследование и разработка индукционных люминесцентных источников света на частотах 100-15000 кГц. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва. 2012.
7. Э.М. Гутцайт. Безэлектродные источники света, использующие электромагнитную энергию высоких и сверхвысоких частот. Радиотехника и электроника. 2003. том 48. с. 5-38
8. J. Shaffer, V. Godyak. J.Illum.Eng.Soc. Winter 1999. p.142
9. ГОСТ 30630.2.1—2013. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на устойчивость к воздействию температуры.
10. Петров В.М. Световые измерения. Лабораторные работы: метод. пособие / В.М. Петров, И.П. Шестопалова, О.П. Меламед. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 39 с.
11. ГОСТ 30804.3.2-2013 (IEC 61000-3-2:2009) Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами
12. Волох С.В. Исследование влияния температуры окружающей среды на светотехнические характеристики безэлектродной люминесцентной лампы. Выпускная работа бакалавра. Москва. 2016г.

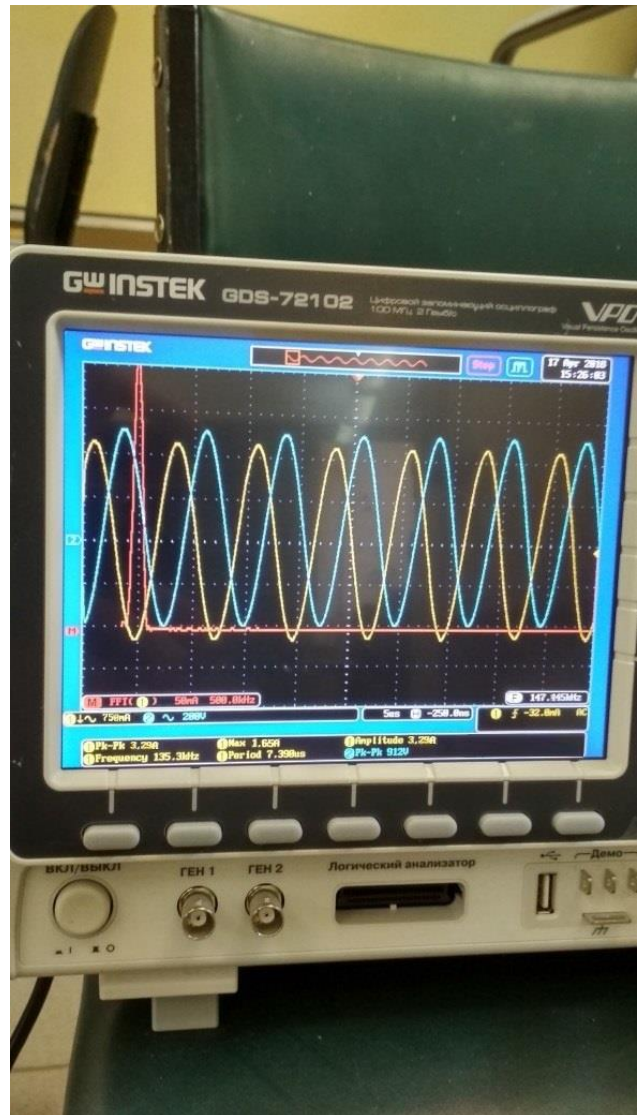
Приложение 1



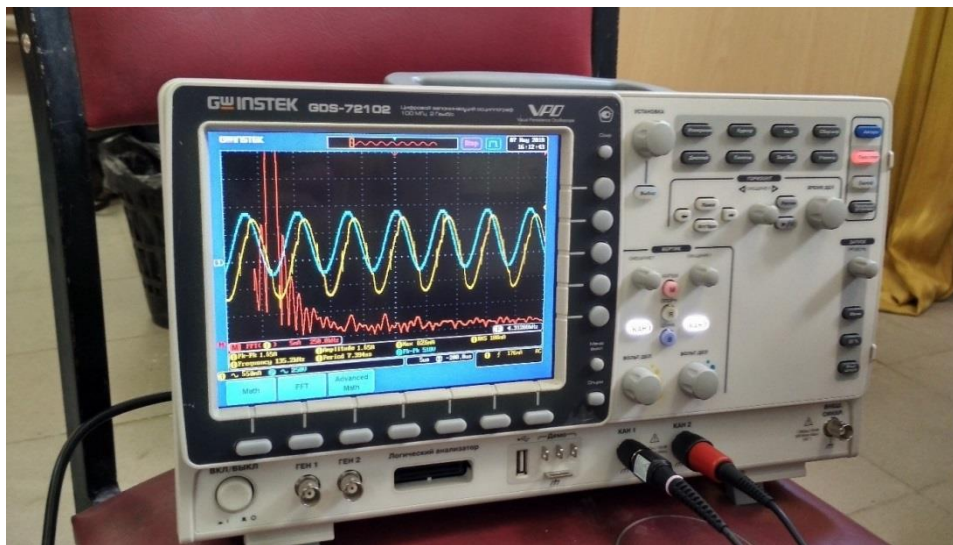
Токр = 60°C



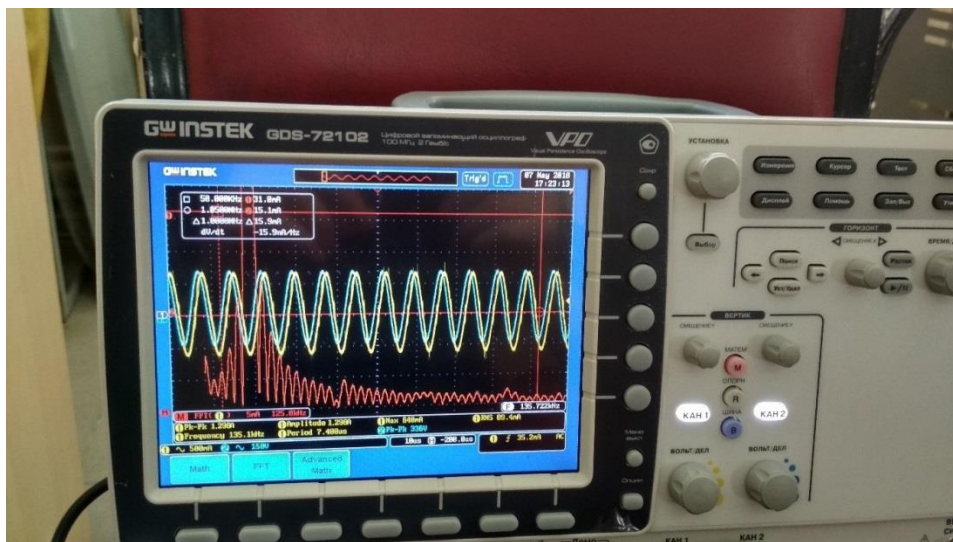
Токр = 50°C



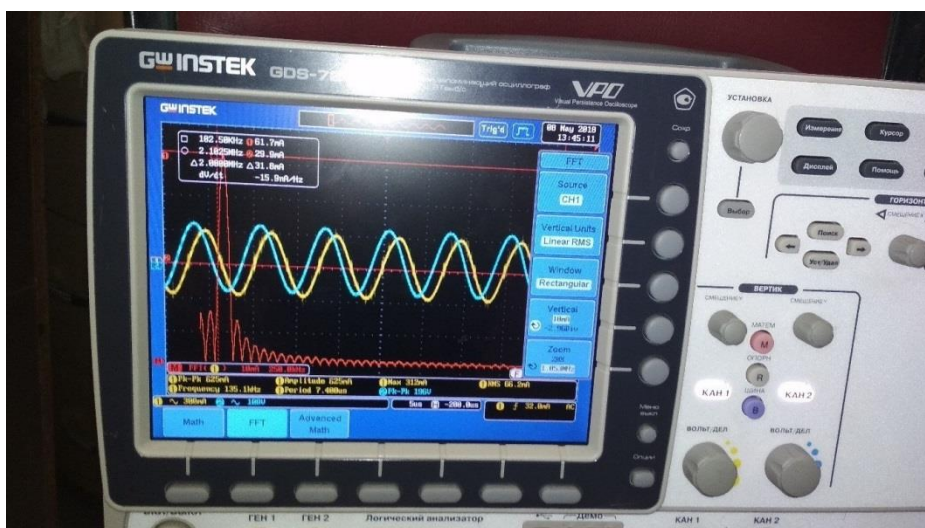
Токр = 40°C



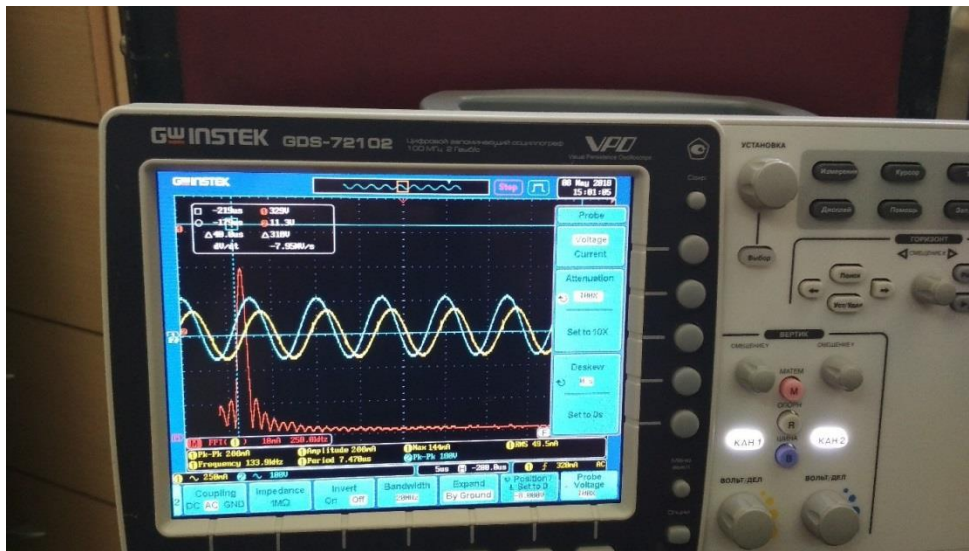
Токp = 10°C



Токp = 0°C



Токp = -10°C



$T_{окр} = -20^{\circ}\text{C}$