

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬ-
НОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУ-
ДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Васильев Кирилл Витальевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**«Измерение параметров цепи питания импульсной микросекундной
лампы-вспышки»**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа 19310

Научный руководитель:

д.т.н., Пальчиков Е. И.

Оценка научного руководителя

« ____ » _____ 2020 г.

Преподаватель практикума:

к.ф. – м.н., Симонов А.А

Оценка преподавателя практикума

« ____ » _____ 2020 г.

Куратор практикума:

к.т.н., Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

« ____ » _____ 2020 г.

Новосибирск, 2020 г.

Аннотация

Целью работы было исследование сильноточной разрядной цепи на основе лампы-вспышки ИСШ400. Для этой цепи были рассмотрены условия периодического, критического и апериодического разрядов, определен наиболее подходящий случай разряда и собраны две схемы: первая – с тиристором и использованием поджигающего электрода лампы и вторая – более современная схема с IGBT транзистором. Обе схемы имели схожий принцип действия. Для каждой из них проведены сильноточные измерения и определены преимущества и недостатки каждой.

Ключевые слова: сильноточная цепь, лампа-вспышка, апериодический разряд, конденсатор, напряжение, шоппировка, индуктивность, тиристор, транзистор.

Оглавление

1. Введение	4
2. Теория	4
2.1 Колебательный контур	4
2.2 Периодические и аperiodические разряды	5
2.3 Выбор оптимального решения	8
3. Эксперимент	9
3.1 Установка с тиристором	9
3.2 Установка с IGBT транзистором	12
4. Заключение	13
5. Литература	14

1. Введение

Исторически, лампы-вспышки использовались в производстве самолетов. Их устанавливали на крыльях самолетов, чтобы определять положение самолета в пространстве. Также они использовались в сложных метеорологических условиях полета и ночью, а также для наземной подготовки летательного аппарата в ночных условиях.

В нашей работе мы рассматриваем разряд на одной из таких ламп, а именно ИСШ400. Она способна выдавать кратковременные импульсы длительностью 0,7 – 1 микросекунд. Во время разряда на лампе возникают огромные токи, напряжения и мощности, что препятствует напрямую проводить измерения, поэтому необходимо уметь качественно проводить оценки параметров.

2. Теория

2.1 Колебательный контур

Зададимся задачей нахождения оптимального решения для уравнения колебаний в контуре.

Рассмотрим простой колебательный контур, представленный на рисунке 1.

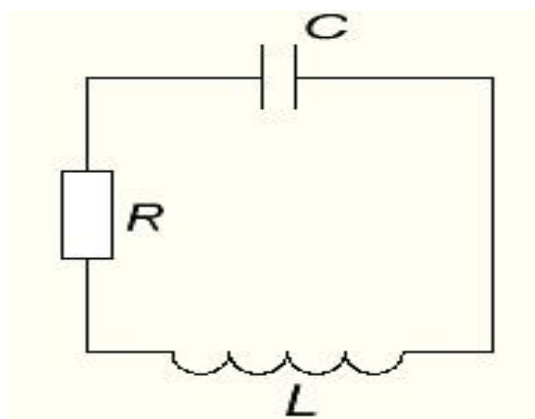


Рисунок 1. Колебательный контур.

По второму закону Кирхгофа, получим:

$$IR + \frac{q}{C} = -L \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

Продифференцируем его по t и разделим на L . С учетом того, что $I = \dot{q}$, получим:

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{dI}{dt} \frac{R}{L} + \frac{I}{LC} = 0$$

Для решения этого дифференциального уравнения составим характеристическое уравнение:

$$p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{1}{LC} = 0 \quad (2)$$

С решениями

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \quad (3)$$

То есть, характер колебаний зависит от знака подкоренного выражения и определяется параметрами R , L и C .

2.2 Периодические и аperiodические разряды.

Рассмотрим возможные решения уравнения (2).

1) *Аperiodический разряд* $\left(\frac{R}{2L} > \frac{1}{\sqrt{LC}}\right)$

Аperiodическим разрядом называется разряд, при котором напряжение на конденсаторе монотонно спадает с некоторого значения U_0 до нуля, т.е. не происходит перезарядки конденсатора.

Ток в этом случае определяется уравнением

$$I(t) = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t} \quad (4)$$

где константы C_1 и C_2 определяются из начальных условий:

$$\begin{aligned} I|_{t=0} &= 0 \\ U_L|_{t=0} &= L \frac{dI}{dt}|_{t=0} = -U_0 \end{aligned}$$

Откуда следует, что:

$$C_1 + C_2 = 0 \quad (5)$$

$$p_1 C_1 + p_2 C_2 = -\frac{U_0}{L} \quad (6)$$

Решая уравнения (5) и (6), получаем, что $C_1 = \frac{U_0}{L(p_2 - p_1)}$ и $C_2 = -\frac{U_0}{L(p_2 - p_1)}$ и напряжение на индуктивности:

$$U_L(t) = \frac{U_0}{(p_2 - p_1)} (p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t})$$

Также, можно определить напряжение на конденсаторе из уравнения (1):

$$U_C(t) = - \left(IR + L \frac{dI}{dt} \right) = \frac{U_0}{(p_2 - p_1)} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}).$$

Графики тока и напряжений приведены ниже:

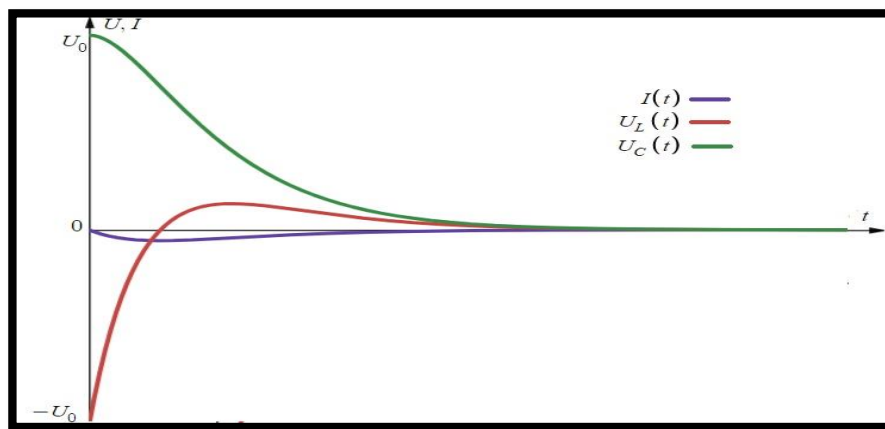


Рисунок 2. Зависимости $U_L(t)$, $U_C(t)$ и $I(t)$.

2) *Критический случай* $\left(\frac{R}{2L} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \right)$

В этом случае стоит рассматривать предельный случай при $p_2 \rightarrow p_1 = p$.

Тогда, из уравнения (4), можно записать:

$$\begin{aligned} I(t) &= \frac{U_0 (e^{p_1 t} - e^{p_2 t})}{L (p_2 - p_1)} = \frac{U_0 e^{pt} (e^{(p_1 - p_2)t} - 1)}{L (p_2 - p_1)} \approx \frac{U_0 e^{pt} \sinh((p_1 - p_2)t)}{L (p_2 - p_1)} = \\ &= -\frac{U_0}{L} t e^{pt}. \end{aligned}$$

Аналогично, определяется напряжение на катушке и конденсаторе:

$$U_L(t) = -U_0(pt + 1)e^{pt}$$

$$U_C(t) = U_0(1 - pt)e^{pt}$$

Из условия видно, что критический случай возникает при $\frac{R}{2L} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, т.е. при

$$R_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C}} = 2\rho_{волн} \quad (7)$$

График $U_L(t)$, $U_C(t)$ и $I(t)$ приведен ниже:

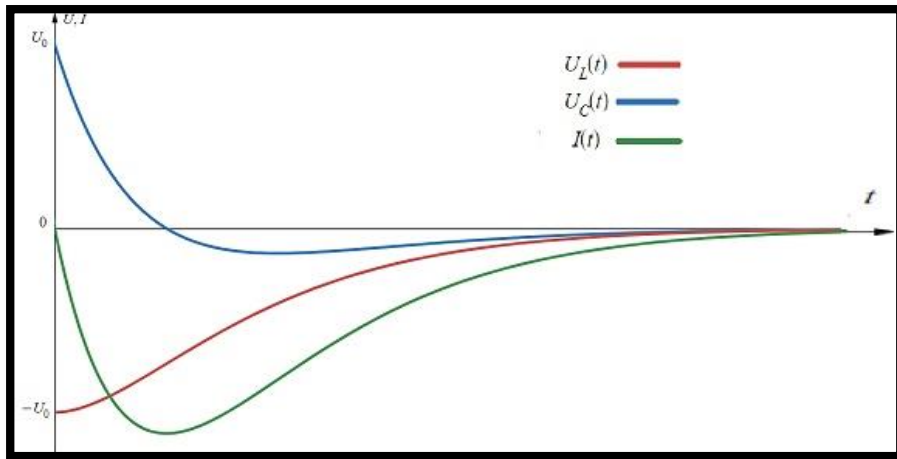


Рисунок 3. Зависимости $U_L(t)$, $U_C(t)$ и $I(t)$ в критическом случае.

3) *Периодический разряд конденсатора* $\left(\frac{R}{2L} > \frac{1}{\sqrt{LC}}\right)$

В этом случае подкоренное выражение отрицательно и корни p_1, p_2 являются комплексно-сопряженными. Решение для этого уравнения будем искать в следующем виде:

$$U_C(t) = Ae^{-\beta t} \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$$I(t) = Be^{-\beta t} (-\beta \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + \omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)),$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$.

Из начальных условий:

$$U_L|_{t=0} = A \sin(\varphi_0) = U_0$$

$$I|_{t=0} = B (-\beta \sin(\varphi_0) + \omega_0 \cos(\varphi_0)) = 0$$

Откуда получаем, что $A \sin(\varphi_0) = \frac{\beta}{\omega_0} U_0$.

Введем следующие обозначения:

$$tg(\varphi_0) = \frac{\omega_0}{\beta}, A = \frac{\sqrt{\omega_0^2 + \beta^2}}{\omega_0} U_0 = \frac{U_0}{\omega_0 \sqrt{LC}}$$

$$\sin(\varphi_0) = \frac{\omega_0}{\sqrt{\omega_0^2 + \beta^2}}, \quad \cos(\varphi_0) = \frac{\beta}{\sqrt{\omega_0^2 + \beta^2}}$$

Подставляя найденные A , $\sin(\varphi_0)$, $\cos(\varphi_0)$ в уравнения и обозначая для краткости

$$U_{C_m} = U_{L_m} = \frac{U_0}{\omega_0 \sqrt{LC}}, \quad I_m = \frac{U_0}{\omega_0 L}$$

Получим окончательные выражения:

$$U_C(t) = U_{C_m} e^{-\beta t} \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$$U_L(t) = U_{L_m} e^{-\beta t} \sin(\omega_0 t - \varphi_0)$$

$$I(t) = I_m e^{-\beta t} \sin(\omega_0 t + \pi)$$

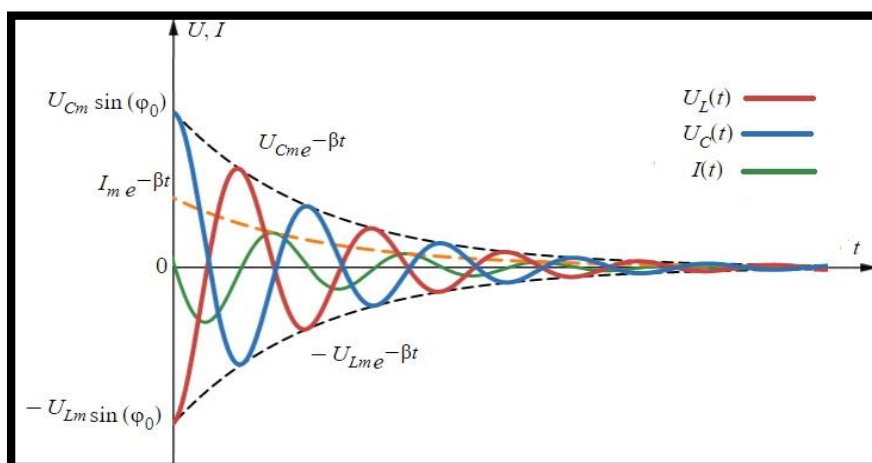


Рисунок 4. Периодические колебания

2.2 Выбор оптимального решения

Теперь, зададимся задачей выбрать оптимальное решение, чтобы кривая зависимости интенсивности от времени была как можно уже во время вспышки и большая часть энергии пошла именно на лампочку. При этом длительность вспышки не должна превышать 1 – 2 микросекунды. К яркости вспышки можно подбратся следующим образом: мощность вспышки пропорциональна квадрату силы тока, если считать, что сопротивление лампы-вспышки постоянно во время разряда, то мощность можно считать равной $P = I^2 R$. Так как интенсив-

ность пропорциональна мощности излучения, то стоит выбрать такое решение, чтобы в начале рост силы тока был максимален, доходя до некоторого максимального значения, и за ним следовал быстрый спад. Периодический колебания можно сразу отбросить, так как возникают перезарядка конденсатора. Остаются апериодический и критический разряды. В первом случае $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, из-за чего могут произойти лишние потери энергии на резисторе и по рис. 5 видно, что отношение среднего значения тока к времени спада (т.е. от 0 до некоторого продолжительного момента времени t) мало по сравнению с крит. случаем. Также стоит выбрать конденсатор с шоппировкой (Индуктивность такого конденсатора практически равна индуктивности стержня таких же размеров. Это достигается за счет того, что на его концы наносят проводник) для снижения потерь энергии на резисторе. Поэтому стоит выбрать апериодический разряд в критическом случае.

3. Эксперимент

3.1 Схема установки

Для выполнения этой работы была собрана следующая схема:

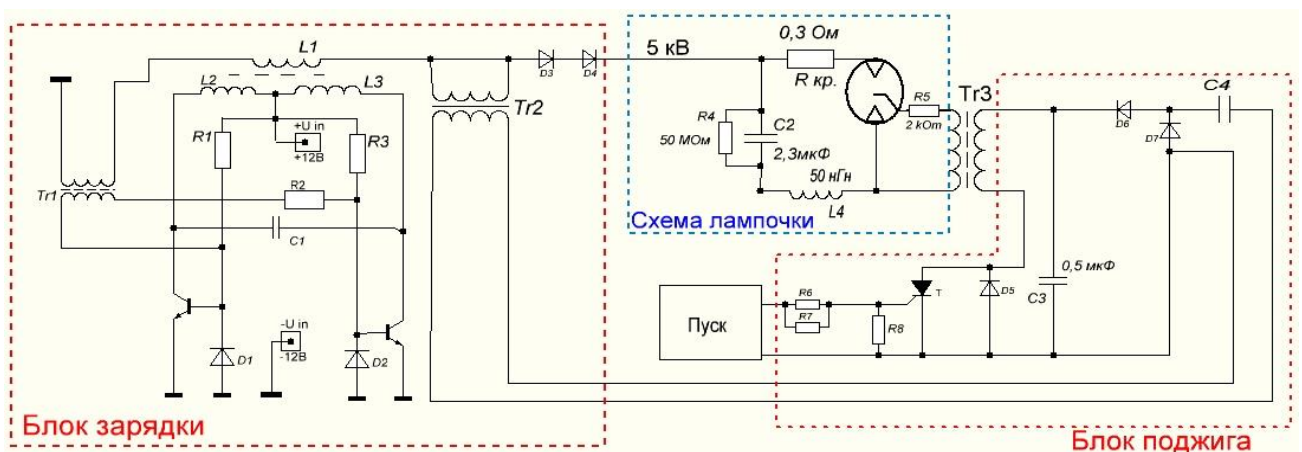


Рисунок 5. Первая схема.

Некоторые паспортные данные: $C_2 = 2,3 \text{ мкФ}$,

$L_{C_2} = 25 \text{ нГн}$ и $L_{\text{лампы}} = 25 \text{ нГн}$ – (паразитная индуктивность),

$$L_4 = L_{C_2} + L_{\text{лампы}} = 50 \text{ нГн.}$$



Рисунок 6. Лампа-вспышка ИСШ400.

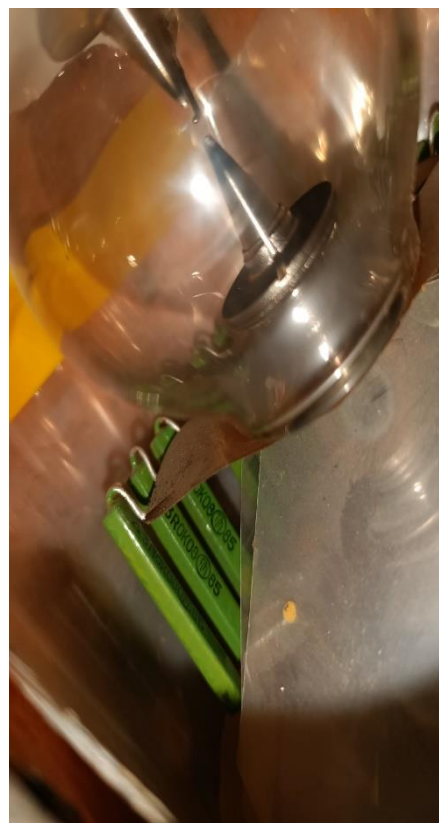


Рисунок 7. Лампа-вспышка.

На рисунке видна связка из параллельно соединённых резисторов. Такое соединение нужно для уменьшения паразитной индуктивности лампы.



Рисунок 8. Конденсатор К75-30 с шоппировкой.

На рис. 8 представлен конденсатор с шоппировкой. Внутри он представляет из себя намотку из ленты. Индуктивность такого конденсатора близка к индуктивности стержня такого же размера. Это достигается за счет напыления проводника на торцы конденсатора.

Эта схема работает по следующему принципу: транзисторный блок зарядки преобразует напряжение 12 В от источника до 5 кВ. Затем, этим напряжением заряжают конденсатор C_2 и через трансформатор Tr_2 конденсатор C_3 до 600 В. Затем “Пуск” открывает тиристор, конденсатор C_3 разряжается, заряд с него проходит через повышающий трансформатор Tr_3 на поджигающий электрод, после чего происходит разряд конденсатора C_2 на лампу. Длительность этого разряда составляет ≈ 1 мкс.

Дополнительно к C_2 подключено сопротивление $R_4 = 50$ МОм. Оно необходимо для обеспечения техники безопасности. Также рекомендуется при повторном проведении эксперимента обесточить схему и подождать не менее $RC_2 \approx 2$ минут.

Для такой длительности вспышки специально было подобрано сопротивление $R_{кр} = 0,3$ Ом, т.к. в этом случае условие $R_{кр} = 2 \sqrt{\frac{L_4}{C_2}} = 0,3$ Ом выполняется и происходит критический случай апериодического разряда.

Рассчитаем параметры цепи во время разрядки. После открытия тиристора, через резистор $R_{кр}$ пройдет заряд $q = C_2 U = 2,3 \cdot 10^{-6} \cdot 5000 = 11,5$ мКл, тогда ток через лампу во время вспышки $I = \frac{dq}{dt} \approx \frac{q}{t} = \frac{11,5 \cdot 10^{-3}}{10^{-6}} = 11500$ А. Также на ней выделится энергия $W = \frac{C_2 U^2}{2} = \frac{2,3 \cdot 10^{-6} \cdot 5000^2}{2} \approx 29$ Дж и мощность $P = \frac{W}{t} \approx 30$ МВт. Для поджига лампы на зажигающий электрод подается напряжение $U_2 = 15$ кВ. Это значит, что напряжение $U_1 = 600$ В с конденсатора C_3 преобразуется в напряжение 13,5 кВ, т.е. коэффициент трансформации Tr_3 равен $k = \frac{U_2}{U_1} = \frac{13500}{600} = 22,5$ и ток во вторичной обмотке $I_1 = \frac{U_2}{R_5} = \frac{13500}{2000} \approx 7$ А.

Недостатки: время срабатывания тиристора составляет 0,5 – 2 микросекунды, что сравнимо с длительностью вспышки.

3.2 Установка с IGBT транзистором

Перейдем к рассмотрению другой установки:

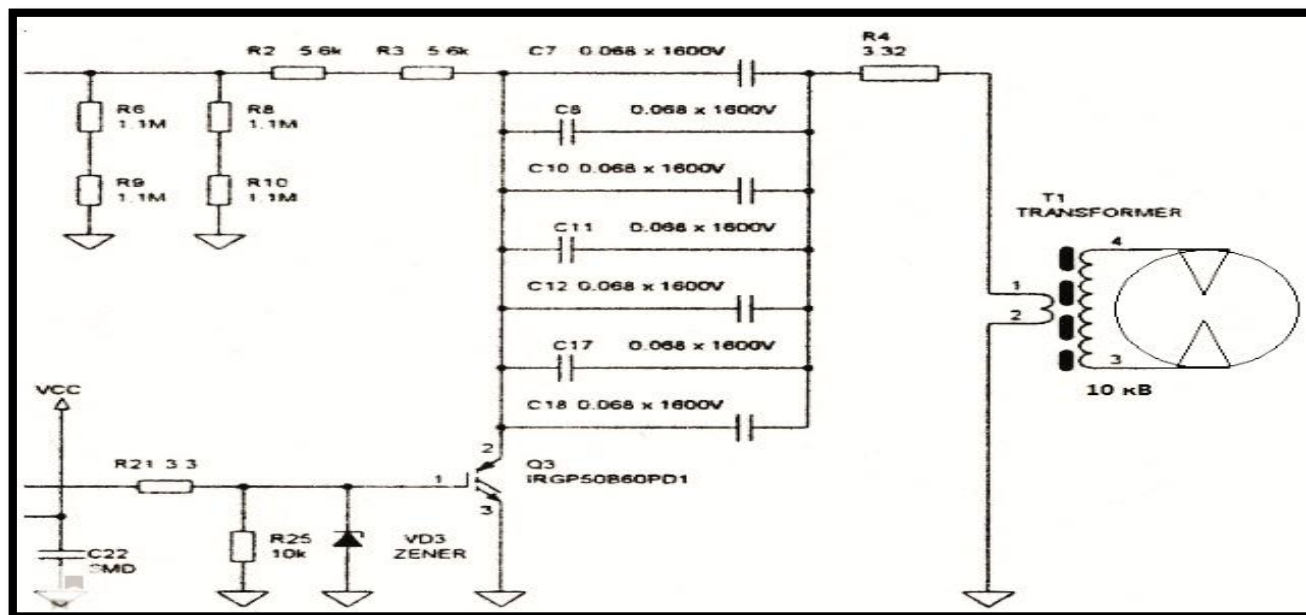


Рисунок 9. Схема с транзистором.

Принцип действия у этой схемы примерно такой же, но задержка срабатывания транзистора составляет 20 нс, что на порядок меньше установки с тиристором.

На рис. 9 изображена лишь часть схемы. С полной версией можно ознакомиться в прикрепленном файле. Семь конденсаторов подключены параллельно для снижения индуктивности.

В этой схеме на электроды лампочки сразу подается энергия с конденсаторов. Известно, что на вторичную обмотку катушки поступает 10 кВ.

Зная коэффициент трансформации ($k = 25$) получаем напряжение на первичной обмотке $U \approx 400$ В и ток $I = \frac{400}{3,3} \approx 120$ А. Такое сопротивление

взято специально, т.к. без него через IGBT транзистор потечет ток $I_1 = \frac{P}{U} \approx$

$\frac{7CU}{2t} = \frac{7 \cdot 0,068 \cdot 10^{-6} \cdot 400}{10^{-6}} \approx 200$ А при максимально допустимом 150 А. Дополни-

тельно, этот резистор обеспечивает нам некоторый оптимум, при котором в системе не происходит ненужных колебаний и не тратится лишней энергии на рассеяние энергии на сопротивление.

4. Заключение

В ходе работы были определены параметры сильноточной разрядной цепи на основе лампы ИСШ400 во время разряда. Для этого подобраны оптимальные условия для проведения экспериментов с расчетом периодического, критического и апериодического разрядов, собраны две схемы и выявлены преимущества и недостатки каждой.

5. Литература

1. Яковлев В.И. Классическая электродинамика: Учеб. Пособие/Новосиб. ун-т. Новосибирск, 2003 г.
2. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: Учебное пособие. 7-ое изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2009 г.— 592 с.: ил.— (Учебники для вузов. Специальная литература).
3. Пальчиков Е.И. Презентация «Сильноточная электроника».
4. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. М.: Энергия, 1975. - 752 с.: ил.
5. <https://leg.co.ua/arhiv/podstancii/silovye-elektricheskie-kondensatory-3.html>
6. <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/227639/IRF/IRGP50B60PD1.html>