

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Литош Дарья Дмитриевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Реализация схемы импульсного и дозированного напуска газа
для инициации и поддержания дугового разряда в мощных генераторах
плазмы**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18306

Научный руководитель:

Аспирант ИЯФ А.В. Бруль
Оценка научного руководителя

«__» _____ декабря _____ 2019 г.

Преподаватель практикума

д.ф.-м.н., проф. В. Б. Рева
Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ декабря _____ 2019 г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т.Астрелин
Итоговая оценка

«_____» _____ декабря _____ 2019 г.

Новосибирск, 2019

Аннотация

В курсовой работе исследовано быстродействие клапанов, используемых для подпитки газом установок в экспериментах по управляемому термоядерному синтезу и в мощных газоразрядных генераторах плазмы. Для этой цели был собрана электрическая схема – генератор двухступенчатого прямоугольного импульса тока с независимо управляемыми амплитудами тока пика и тока удержания для питания исследуемых клапанов. Для измерения времени задержки открывания и закрывания клапанов использованы характерные особенности осциллограммы тока, протекающего через катушку клапана. Такая схема, позволила исключить влияние фронтов питающего токового импульса на измерение быстродействия.

Проведены эксперименты по измерению быстродействия серии клапанов от нескольких производителей, в том числе разработки ИЯФ СО РАН, измерена зависимость характеристик клапанов от параметров питающего токового импульса.

Были проведено численное моделирование динамики клапанов и сравнение расчётных и экспериментальные зависимостей. Полученные результаты позволяют сравнивать клапаны различных типов и выбирать оптимальные требования к питанию.

Ключевые слова: быстродействие клапана, управляемый термоядерным синтезом, мощные генераторы плазмы, ток пика и ток удержания.

Оглавление

1. Введение	4
2. Типы клапанов	5
3. Теоретическая часть	8
3.1 Электромагнит	8
3.2 Методика расчетов	9
4. Схема эксперимента	11
5. Обработка экспериментальных данных	13
6. Заключение	15
7. Список литературы	16

1. Введение

Широкое применение в научных исследованиях инжекторов нейтральных частиц, используемых для нагрева и диагностики плазмы, обуславливает актуальность их изучения. Для генерации плазмы в инжекторе используют дуговые или ВЧ источники плазмы. В настоящее время в ИЯФ СО РАН имеется достаточно большой опыт по созданию импульсных дуговых генераторов рис.1. Плазма в них генерируется разрядом в рабочем газе, инициация и подпитка этого разряда в течение рабочего импульса осуществляется с помощью электромагнитных газовых клапанов.

Клапаны являются неотъемлемой частью установок, в которых требуется импульсный напуск рабочего газа с длительностью рабочего импульса 10 - 40 мс, поэтому они должны обладать высоким быстродействием.

Целью данной работы являлось исследование быстродействия клапанов, используемых в мощных дуговых генераторах плазмы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить принцип работы соленоидальных газовых клапанов, используемых в мощных генераторах плазмы.
2. Освоить метод расчета магнитных полей в катушке с подвижным сердечником.
3. Провести эксперимент по измерению быстродействия клапана.

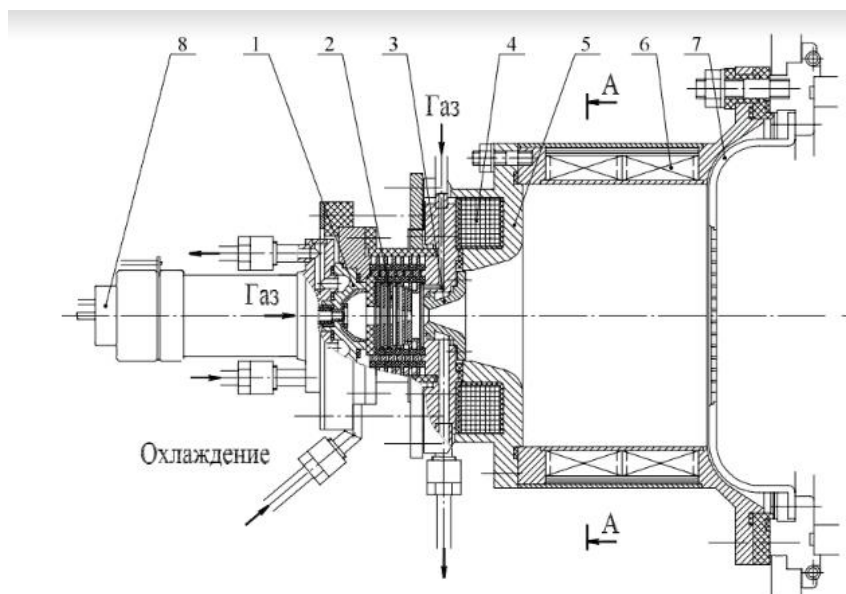


Рис.1. Схема дугового источника плазмы: 1 - катод, 2 - диафрагмы дугового канала, 3 - анод, 4 - катушка для создания продольного магнитного поля, 5 - магнитопровод, 6 - постоянные магниты, 7 - электрод ионно-оптической системы, 8 - газовый клапан.

2. Типы клапанов

Клапан – запорный элемент электромеханического действия, выполняющий функцию регулировки объемов жидкой или газообразной среды в технических или научных системах. В генераторах плазмы инициация и подпитка газом дугового разряда осуществляется именно с помощью газового клапана. Существует два основных вида клапанов: соленоидальные и пьезоклапаны.

Пьезоклапаны

Пьезоклапаны позволяют регулировать напуск газа. При подаче разности потенциалов на пьезоэлемент зазор открывается, при отключении источника – зазор закрывается. Механическая подвижная часть основана на пьезоэлектрическом эффекте. Этот эффект заключается в изменении размеров пьезокристалла под действием электрического поля. Отметим, что



Рис. 2. Пьезоклапан

под действием приложенного напряжения пьезоэлемент приращение

размеров пьезокристалла является достаточно малым. На рис. 2 представлен пьезоклапан, его характерная длина составляет порядка 6 см.

Соленоидальные клапаны

Электромагнитные клапаны предназначены для дозированного напуска газа. На катушку клапана подается напряжение, и под действием магнитного поля якорь втягивается в катушку, тем самым открывая воздушный зазор. Механической подвижной частью является якорь. Для контроля газонапуска в конструкции соленоидального клапана можно изменять диаметр входного



Рис.3.Соленоидальный клапан.

микроотверстия или же изменять давление газа в магистрали. Электромагнитный клапан представлен на рис. 3, его характерная длина составляет порядка 5 см. Рабочий диапазон давлений 1-10 атм. (перепад на давления на входе и на выходе).

Принцип работы соленоидального клапана.

На рис.5 изображен чертеж соленоидального клапана. В закрытом состоянии рис. 4 а) доступ газа через дозирующее отверстие перекрыт якорем (4). Якорь является подвижной частью магнитопровода (8,9) и открывает пропускное отверстие для потока газа (водорода или дейтерия), втягиваясь в соленоид (3) под действием магнитного поля, когда через катушку протекает ток. Открытое состояние клапана изображение на рис. 4 б). После исчезновения магнитного поля пружина (6) возвращает якорь в начальное состояние.

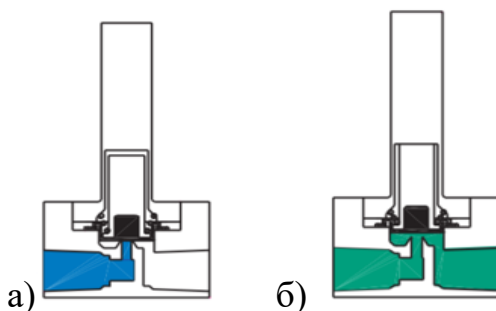


Рис. 4. Состояние клапана. а) закрыт, б) открыт.

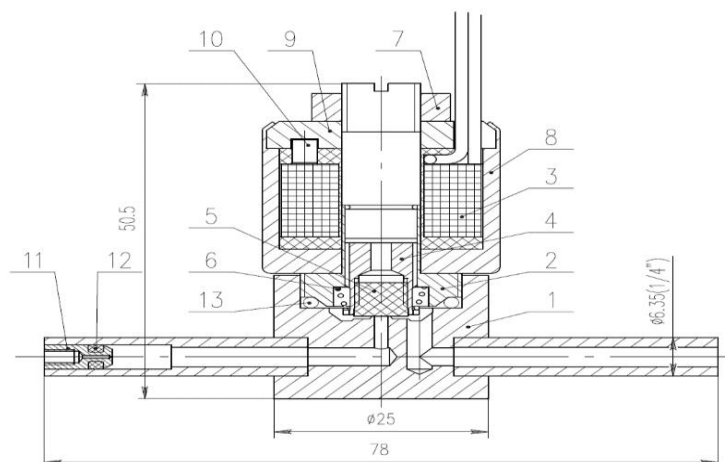


Рис. 5. Чертёж соленоидального клапана: 1 - корпус; 3 – катушка; 4 - якорь; 5 – уплотнитель; 6 – пружина; 7 – гайка; 8,9 - магнитопровод.

Требования к соленоидальному клапану.

В случае использования соленоидального клапана в мощных генераторах плазмы, данные устройства должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Надежность и безотказность: соленоидальный клапан должен открываться и закрываться всегда, когда это необходимо экспериментатору.
2. Устойчивость к сильным внешним электрическим и магнитным полям для избежания ложного срабатывания клапана.
3. Высокое быстродействие. Необходимо для точной синхронизации с системой инициации поджига и питания дугового разряда.
4. Чистота конструкции и защита от попадания загрязнений. Плазма, которая вырабатывается на данной установке, должна быть без примесей, поэтому зависит от химической чистоты газа, который напускает клапан.
5. Экономичность, простота питания и управления.

3. Теоретическая часть

3.1 Электромагнит

Электромагнит представляет собой катушку (соленоид) с помещенным внутрь нее железным сердечником. Катушка электромагнита насажена на сердечник из мягкого, отожженного железа или сплавов железа с кремнием, никелем и т. д. Такое железо обладает наименьшим остаточным магнетизмом. Остаточная намагниченность может привести к залипанию якоря.

Если по обмотке электромагнита пропустить электрический ток, то вокруг обмотки образуется магнитное поле, которое намагничивает сердечник. Так как сердечник сделан из мягкого железа, то он намагнитится мгновенно. Возникает электромагнитная сила, действующая на якорь, и он, преодолевая силу тяжести, действие пружин и т. п., притягивается к неподвижной части магнитопровода. Если затем выключить ток, то магнитные свойства сердечника также быстро исчезнут, и он перестанет быть магнитом.

Расчет силы притяжения электромагнита часто проводится приближенно, исходя из следующих соображений:

1. Ток I в обмотке имеет установившееся значение.
2. Сердечник и якорь не насыщены.
3. Поле в рабочем зазоре равномерно.

Сила F действует в сторону уменьшения зазора.

Величина силы, развиваемой электромагнитом, может быть рассчитана с помощью формулы Максвелла:

$$F = \frac{B^2 * S}{2 * \mu_0}$$

3.2 Методика расчетов

Уравнение движения якоря.

Соленоид состоит из N одинаковых витков изолированного проводящего провода, намотанных на каркас или сердечник. Схема соленоида с сердечником представлена на рис.6. По виткам протекает одинаковый ток. Магнитные поля, созданные каждым витком, складываются по принципу суперпозиции. По теореме о циркуляции вектора напряженности магнитного поля по замкнутому контуру: $\oint \vec{H} * d\vec{L} = \sum_{i=1}^n I_i$. Напряженность поля в зазоре: $H = \frac{B}{\mu_B \mu_0}$, значит $I * N = \frac{B * l}{\mu_c \mu_0} + \frac{B * L_B}{\mu_B \mu_0}$. Первым слагаемым этого выражения можно пренебречь (так как $\mu_c \gg \mu_B$). Воспользовавшись формулой Максвелла для расчета силы электромагнитного притяжения электромагнита, получим: $F = \frac{B^2 * S}{2 * \mu_0} = \frac{\mu_0 * \mu_B^2 * I^2 * N^2}{2 * L_B^2}$. Применим второй закон Ньютона: $F = m * a$, где $a = \frac{d^2 x}{dt^2}$, $m = p * h * S$.

Следовательно, уравнение движения якоря можно описать следующим образом:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{\mu_0 * I^2 * N^2 * \mu_B^2}{2 * p * h * L_B^2} \quad (1)$$

I – сила тока, подаваемого блоком питания (12.5 А)

N – число витков на катушке (185) (3VD)

p – плотность железа (8000 кг/м³)

l – длина контура магнитопровода (5 см)

L_B – зазор (5 мм)

h – длина якоря (1 см)

μ_0 – магнитная постоянная ($1,26 * 10^{-6}$ Гн/м)

$\mu_{\text{в}}$ - магнитная проницаемость воздуха ($1,26 * 10^{-6} \text{ Гн/м}$)

При подстановке постоянных величин в уравнение (1), получим:

$$x''(t) = 0.65 * 10^6 \quad (2)$$

$x(t)$ – координата якоря в см

t – время в секундах

Обозначим начальные условия:

$$x(0)=0 \text{ и } x'(0)=0$$

Добавляя к уравнению (2) начальные условия получаем задачу Коши:

$$\begin{cases} x'' = 0.65 * 10^6 \\ x(0) = 0 \\ x'(0) = 0 \end{cases}$$

Её решением является равноускоренное движение – парабола. Это уравнение соответствует постоянной во времени магнитной силе.

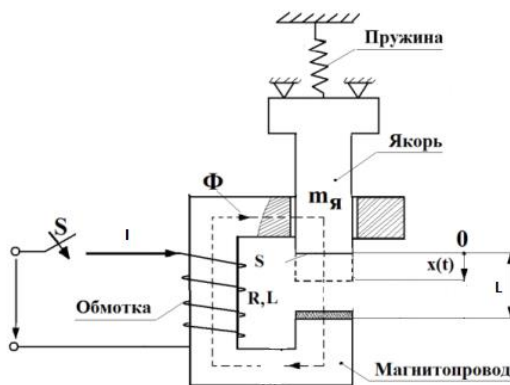


Рис..6 Условная схема ЭМ.

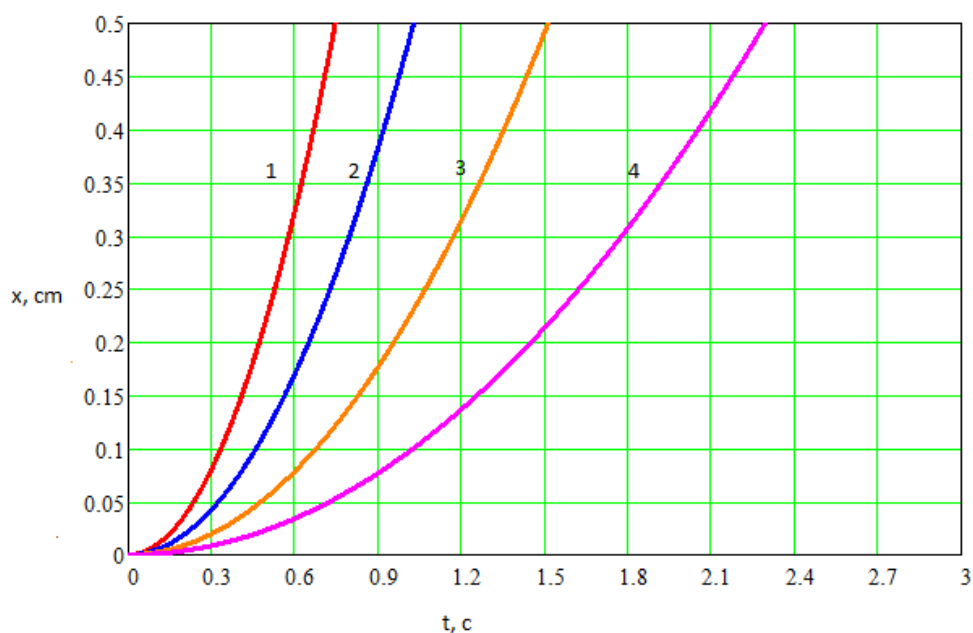


Рис.7. График зависимости положения якоря от времени:
 1: ток 4,7 А, время 0,73 мс, 2: ток 2,9 А, время 1,16 мс, 3: ток 2,3 А, время 1,5 мс, 4: ток 1,8 А, время 2,3 мс.

Используя уравнение движения якоря (1) и экспериментально полученные значения минимальной силы тока, необходимой для открытия клапана, были построены кривые, описывающие зависимость положения якоря от времени (см. рис.7).

Численные оценки несколько выше экспериментальных данных. Это объясняется тем, что при расчетах не учитывалось, что величина воздушного зазора является переменной.

4. Схема эксперимента.

Исследование быстродействия клапана осуществляется с помощью схемы, изображенной на рис.8. Схема работает следующим образом: источник питания заряжает конденсатор С1 через резистор $R1=3,3$ кОм до напряжения 300 В. Далее ключ 1 замыкается на заданный промежуток времени 1 - 11 мс, обеспечивая пиковый ток до 6 А, что способствует быстрому открыванию клапана, после чего размыкается. Ключ 2 замыкается с задержкой относительно первого ключа, обеспечивая ток удержания (0,3 – 1,2 А), при котором клапан

остается открытым в течение 10-40 мс. В цепи присутствует индуктивность, она препятствует резкому изменению тока в цепи. Поэтому время нарастания фронта $t=L/R$ должно быть много меньше 1 мс.

Изменяя напряжение на источнике питания, регулируется ток, протекающий через индуктивность, что позволяет влиять на скорость открытия клапана. Величина тока, протекающего через катушку, измерялась при помощи шунта 0,1 Ом. По осциллограмме тока рис.9 определяются времена открытия и закрытия клапана. Время открытия на осциллограмме отмечено вертикальной пунктирной линией.

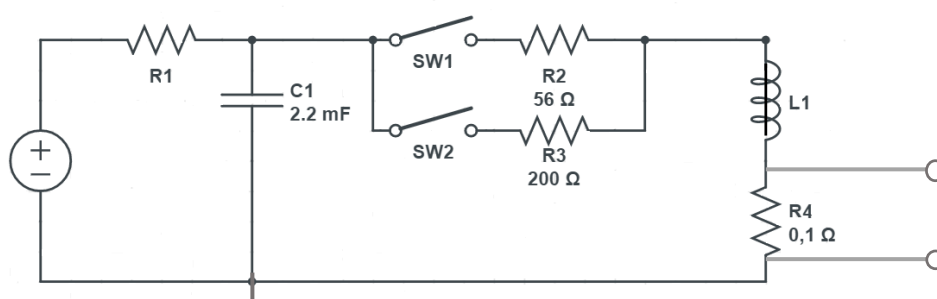


Рис. 8. Схема стабилизации тока

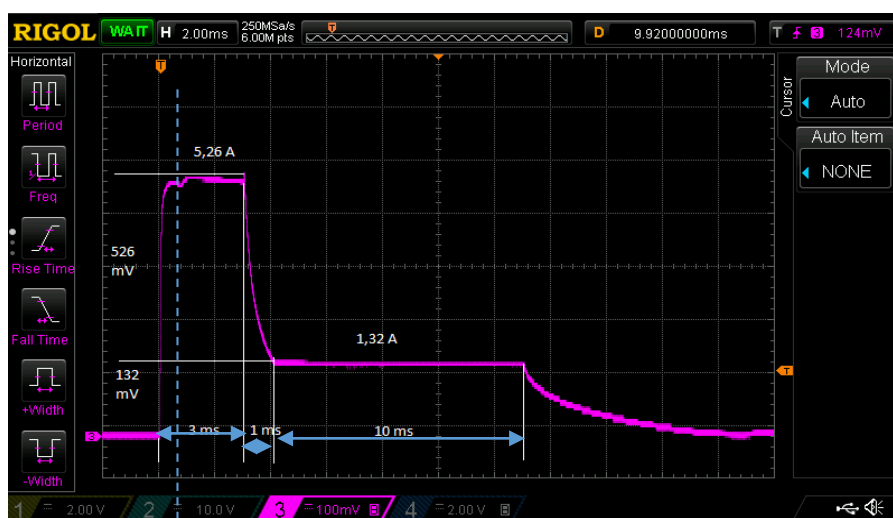


Рис. 9. Осциллограмма тока для клапана ИЯФ.

С помощью данной схемы были испытаны 3 вида клапанов: Gems Sensors &

Controls (3VDC и 24 VDC) и клапан, разработанный в лаборатории 9.0 (ИЯФ). Корпусы клапанов Gems Sensors & Controls и ИЯФ изготовлены из нержавеющей стали.

5. Обработка экспериментальных данных.

С помощью мультиметра были произведены измерения сопротивление и индуктивность различных клапанов, данные представлены в таблице. Так же в таблице приведены времена открытия, закрытия клапанов и минимальный ток, необходимый для открытия клапана.

Название клапана	R, Ом	L, мГн (при $f=100\text{кГц}$)	T(открытия), мс	T(закрытия), мс	I мин, А
3VDC #1	1,6	0,55	4,5	11,4	0,8
24VDC #2	78,96	66,43	3,9	28	0,3
ИЯФ	0,44	0,098	10,5	8,2	1,2

Таблица. Основные характеристики клапана.

На рис.10 приведена осциллограмма тока в катушке, на которой отчетливо видны времена открывания и закрывания клапана. На катушку подается прямоугольный 6 мс импульс тока. Вследствие присутствия индуктивности ток в цепи изменяется плавно с характерным временем L/R . На 3,6 мс виден провал тока, это объясняется тем, что при втягивании якоря в катушку индуктивность катушки резко возрастает, вследствие исчезновения воздушного зазора, что приводит к уменьшению тока. Спустя 11 мс по окончании импульса видно возрастание тока. Это связано с уменьшением индуктивности и увеличением воздушного зазора.

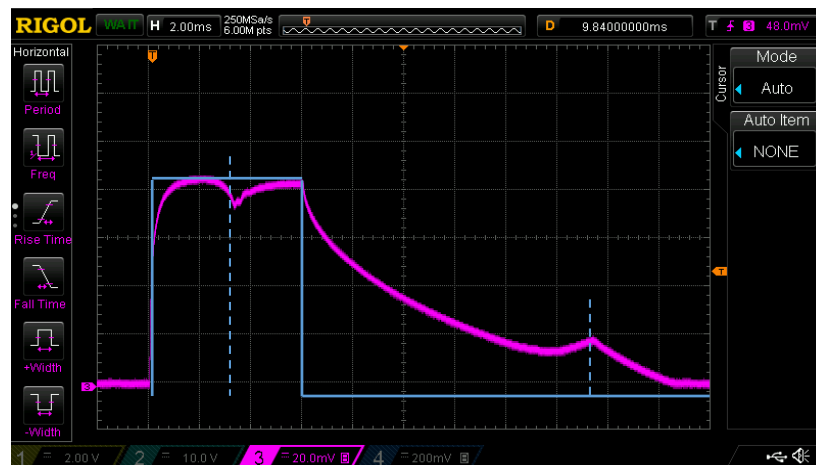


Рис. 10. Осциллограмма минимального тока для открытия клапана 3VDC.

На рис. 11 представлен график зависимости времени открывания трех исследуемых клапанов от тока, протекающего через катушку. На графике отчетливо видно, что при достижении некоторого значения тока время открывания клапана слабо изменяется. Данное явление связано с насыщением магнитного поля в зазоре: при достижении определенного тока в катушке сила, действующая на сердечник, остается постоянной.

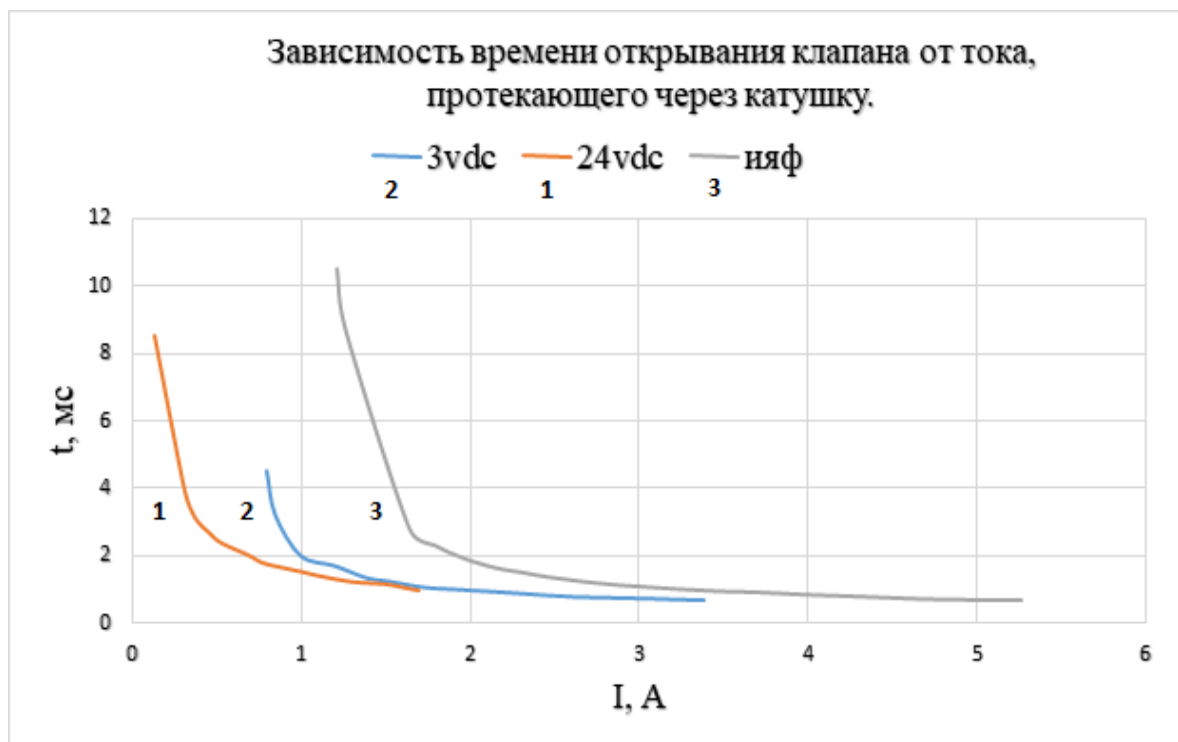


Рис.11. График зависимости времени открывания клапана от тока, протекающего через катушку.

6. Заключение.

В ходе выполнения работы автор ознакомился с принципом работы соленоидальных газовых клапанов, а также мощных генераторов плазмы, и изучена схема напуска газа. Сняты и обработаны осциллограммы тока, иллюстрирующие быстроедействие различных клапанов. Были получены численные оценки времени открывания клапана, используя уравнение движения якоря в магнитном поле. Экспериментальные данные хорошо согласуются с расчётами. Полученные результаты предполагается использовать при разработке схем питания для описанных выше клапанов.

7. Список литературы

1. Яковлев В.И. Классическая электродинамика. Часть 1.
2. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы.
3. Ступишин Н.В., Дейчули П.П., Иванов А.А., Мишагин В.В., Квазистационарный дуговой генератор плазмы для диагностического инжектора быстрых атомов, препринт, Новосибирск 2004.
4. Деревянкин Г.Е., Дудников В.Г., Журавлев П.А., Электромагнитный затвор для импульсного напуска газа. Новосибирск 1975.
5. А.А.Павлов, Ал.А. Павлов, Д.Е.Черепанов. Правила выполнение курсовых работ:учеб. пособие Новосиб. гос. ун-т. –Новосибирск : ИПЦНГУ, 2017. –37 с.