

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»

ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»

(наименование кафедры)

11.03.04 Электроника и наноэлектроника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Промышленная электроника

(направленность (профиль)/специализация)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему «Импульсная схема питания намагничивателя постоянных магнитов»

Студент

А.С. Охов
(И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

Руководитель

А.К. Кудинов
(И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

Допустить к защите

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент А.А.Шевцов
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

« _____ » _____ 2019г.

Тольятти 2019

Аннотация

Объем 54 с., 26 рис., 1 табл., 29 источников.

МАГНИТОТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ, НАМАГНИЧИВАНИЕ, ЭЛЕКТРОМАГНИТ, ИМПУЛЬСНЫЕ ПОЛЯ

Объектом исследования являются современные магнитотвердые материалы и установки для их намагничивания.

Цель работы – провести теоретические исследования и разработать импульсную установку для намагничивания постоянных магнитов.

В данной работе рассмотрены характеристики современных магнитотвердых материалов. Проведена классификация магнитотвердых материалов. Рассмотрены некоторые намагничивающие установки. Выбрана для разработки импульсная установка. Произведен поиск технических решений проектирования импульсных установок. Произведена разработка и расчет импульсной намагничивающей установки. Произведен расчет элементов и параметров установки.

ABSTRACT

Volume 54 p., 26 fig., 1 tab., 29 sources.

**MAGNETIC MATERIALS PERMANENT MAGNETS, MAGNETIZATION,
ELECTROMAGNET, PULSE FIELDS**

The objects of research are modern magnetically hard materials and installations for their magnetization.

The purpose of the work is to conduct theoretical studies and develop a pulsed installation for magnetizing permanent magnets.

In this work discusses the characteristics of modern magnetic materials. Classification of hard magnetic materials has been carried out. Some magnetizing installations are considered. Selected for the development of a pulse installation. Search for technical solutions for the design of impulse installations. The development and calculation of a pulsed magnetizing installation. The calculation of the elements and parameters of the installation.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Обзор магнитотвердых материалов и их характеристик	6
1.1. Классификация магнитных материалов	6
1.2. Кривая намагничивания	8
1.3. Петля гистерезиса	10
2. Устройства для намагничивания магнитотвердых материалов	14
2.1 Общие соображения по намагничиванию постоянных магнитов	14
2.2. Классификация намагничивающих устройств	15
2.2.1 Намагничивающие установки на постоянном токе	15
2.2.2 Импульсные намагничивающие установки	19
3. Разработка импульсной намагничивающей установки конденсаторного типа	21
3.1. Основы проектирования импульсных установок	21
3.2. Поиск технических решений построения импульсных намагничивающих установок	24
3.3. Выбор структурной схемы	38
3.4. Электрическая схема установки	39
3.5. Расчет узлов (элементов) намагничивающей установки	42
Заключение	50
Список используемых источников	51

ВВЕДЕНИЕ

В наше время практически во всех отраслях промышленности, используются и применяются магнитотвердые материалы. Постоянные магниты, изготовленные из них, широко применяются не только в технике, но и при научных исследованиях для создания постоянных магнитных полей самого разнообразного диапазона и конфигураций.

Интерес к таким материалам усилился в последнее время в виду новых открытий в области физики магнитных материалов, благодаря которым появились постоянные магниты с большой коэрцитивной силой – редкоземельных.[1] Но все же потребность авиационно-космической техники, а также заказы оборонных и промышленных предприятий требуют дальнейшего развития магнитотвердых материалов со специальными магнитными свойствами, таких, например, как магнитные композиционные материалы на основе ультрадисперсионного эти материалы, как можно контролировать степень их промагничивания и какую измерительную аппаратуру выбрать. Эти задачи усложняются тем, что постоянные магниты разного применения имеют, как показывает обзор литературных источников и некоторых патентных исследований , различные размеры, объемы и характеристики. В выпускной работе была поставлена задача анализа вопросов, возникающих при намагничивании современных литых магнитотвердых материалов относительно простой формы – цилиндрических, скобообразных и т.д.

1. Обзор магнитотвердых материалов и их характеристик

1.1. Классификация магнитных материалов

Общепринятое определение магнитных материалов дано в ГОСТ 19693 74 «Материалы магнитные. Термины и определения», согласно которому это материалы, которые обладают свойствами ферро- или ферримагнетика. В практике «магнитный материал» означает наличие у него магнитных свойств, за счет которых он может быть использован для создания различных устройств.

По магнитным свойствам магнитные материалы делятся на:

1. Магнитомягкие
2. Магнитотвердые
3. Материалы специального назначения

К магнитным характеристикам магнитных материалов относятся кривые намагничивания, петля гистерезиса, разные виды магнитной проницаемости и магнитные потери.

Для магнитомягких материалов характерными свойствами являются меньшие потери на перемагничивание, малые значения коэрцитивной силы и большие значения магнитной проницаемости. Магнитотвердые материалы обладают высоким значением коэрцитивной силы и примерно такой же как у магнитомягких значением остаточной индукции.

Наиболее наглядно можно представить магнитные характеристики магнитотвердых материалов на рисунке 1.1, где приведены схематические изображения кривых намагничивания по намагниченности $I \mu_0 I = f(H)$, участками петли гистерезиса для I и II квадранта по индукции $B = f(H)$, максимальной магнитной энергии $W = f(B)$, и коэффициентом возврата $\mu\Delta = f(B)$. [2]

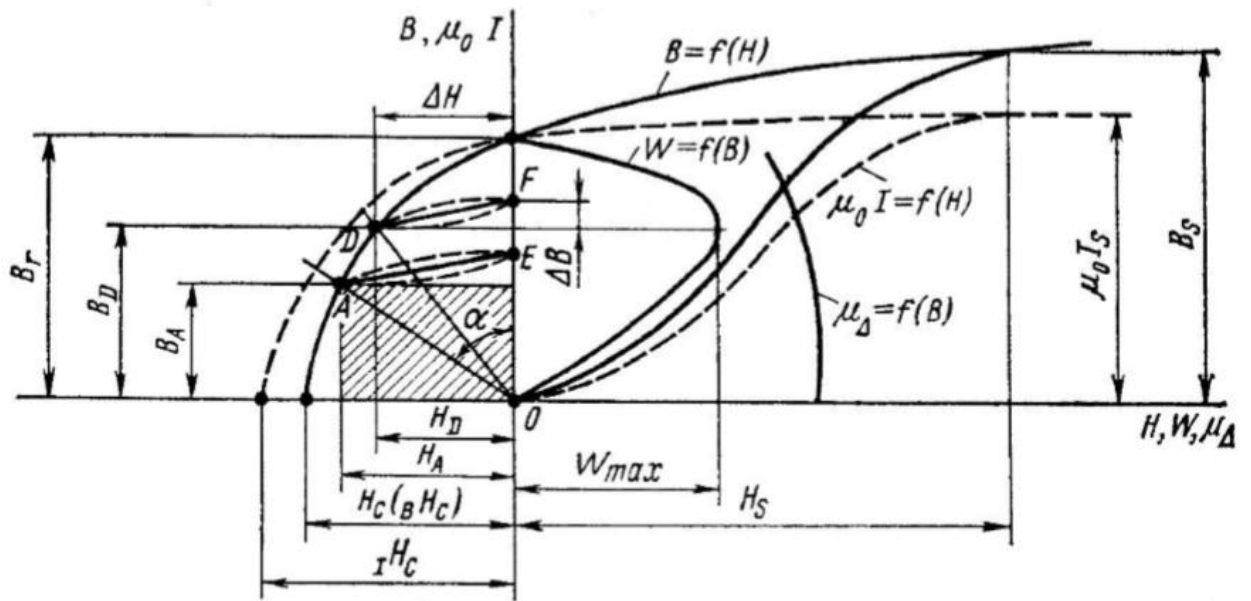


Рисунок 1.1 Изображение кривых намагничивания и размагничивания

Поскольку магнитотвердые материалы используются чаще всего в качестве постоянных магнитов – то есть активные источники, создающие внешние магнитные поля, то его параметрами являются:

1) Петля гистерезиса.

2) Удельная магнитная энергия. $W_A = \frac{B_A \cdot H_A}{2}$. Из рисунка 1.1 видно, что точка D соответствует наибольшему значению удельной магнитной энергии W_{max} . Также пользуются величиной $(BH)_{max}$, называемой энергетическим произведением.

3) Коэффициент выпуклости кривой размагничивания материала $\gamma = \frac{(BH)_{max}}{B_r H_c}$, где B_r – остаточная индукция, H_c – коэрцитивная сила.

4) Коэффициент возврата $\mu\Delta = \frac{\Delta B}{\mu\Delta H}$ оценивает ход прямой возврата, по которым происходит изменение магнитного состояния (прямые AE и DF), где ΔB – изменение индукции, соответствующее изменению поля ΔH (см. рис. 1.1).

1.2. Кривая намагничивания

Во многих вариантах с целью получения кривых намагничивания берут размагниченное состояние образца в качестве начального состояния.

Ферромагнитные материалы состоят из областей, которые при отсутствии внешнего поля намагничены до насыщения. Если образец из ферромагнитного материала не испытывал действие магнитного поля, то области самопроизвольного намагничивания у него размещены так, что его намагниченность равна нулю, то есть он находится в размагниченном состоянии. Поэтому необходимо условиться о начальном состоянии среды, для которой формируется зависимость индукции от напряженности магнитного поля. Под начальным состоянием понимают состояние полного размагничивания, это когда намагниченность и напряженность поля равна нулю ($J=0$ и $H=0$). Если установить этот образец в магнитное поле, можно найти его кривую намагничивания $J(H)$ (или кривую индукции $B(H)$), ее еще называют кривой первоначального намагничивания (индукции). Стандартный вид кривой намагничивания изображен на рисунке 1.2.

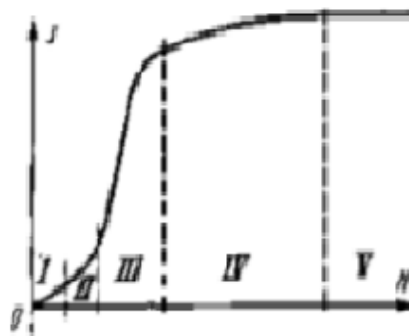


Рисунок 1.2. Кривая первоначального намагничивания

Кривую первоначального намагничивания можно разделить на пять участков (рис. 1.2) I — область начального намагничивания (проницаемость постоянна); II — область Рэлея, это область, где величина нормальной остаточной намагниченности прямо пропорциональна квадрату напряженности; III — область наибольшей проницаемости; IV — область приближения к насыщению; V — область парапроцесса.

При намагничивании размагниченого образца различают некоторые виды зависимостей:

- 1) нулевая кривая намагничивания;
- 2) безгистерезисная кривая намагничивания;
- 3) основная кривая намагничивания.

Нулевая кривая почти совпадает с основной

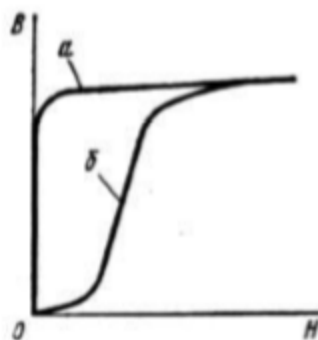


Рисунок 1.3. Кривые намагничивания.

Все характеристики, которые были рассмотрены, относятся к характеристикам магнитного вещества, и при их определении магнитная цепь образца должна быть замкнута. При разомкнутой цепи нужно учитывать собственное поле образца — размагничивающее поле H_p , которое будет направлено встречно внешнему намагничивающему полю H .

$$h = H - H_p. \quad (1.1)$$

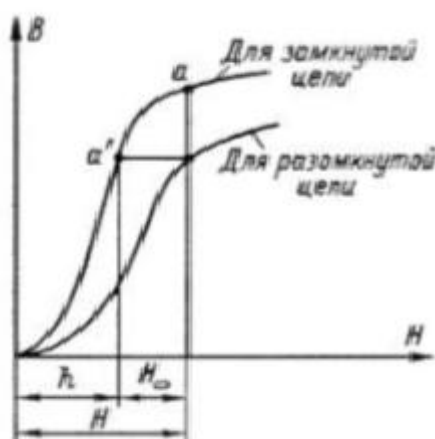


Рисунок 1.4. Основные кривые намагничивания для замкнутой и разомкнутой цепи

Отношение $B=f(H)$, полученную для замкнутой магнитной цепи, принято называть кривой намагничивания вещества, а отношение $B=f(H)$, полученную для разомкнутой цепи называют кривой намагничивания тела. [4]

Существует представление магнитной проницаемости вещества

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 \cdot h}, \quad (1.2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, также есть представление магнитной проницаемости тела

$$\mu_T = \frac{B}{\mu_0 \cdot H}, \quad (1.3)$$

1.3. Петля гистерезиса

Процесс намагничивания, за исключением области с постоянной проницаемостью и области парапроцесса, является необратимым. Если после достижения в процессе намагничивания некоторой величины намагниченности, соответствующей точке А (рис. 1.5), уменьшить величину напряженности магнитного поля, то намагниченность будет изменяться по кривой, отличной от первоначального намагничивания. Это явление называется гистерезисом.

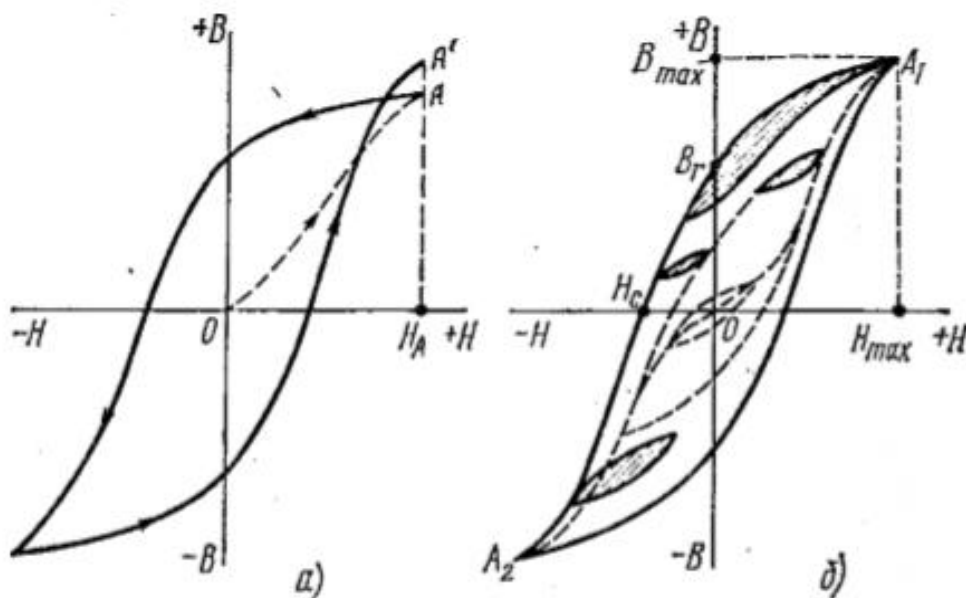


Рисунок 1.5 – Петли гистерезиса

Если изменять несколько раз напряженность магнитного поля, в которое помещен образец, от $+H_{max}$ до $-H_{min}$ и обратно, то петля гистерезиса будет каждый раз немного изменяться, как показано на рис. 1.3, и только после многократного (10—12 раз) изменения напряженности поля от $+H_{max}$ до $-H_{min}$ и обратно получается установившийся цикл (петля) гистерезиса.

Основными характеристиками петли гистерезиса являются:

1. остаточная индукция B_r ,
2. коэрцитивная сила H_c
3. площадь петли.

Остаточная индукция B_r - это индукция которая остается в предварительно намагниченном образце после снятия внешнего магнитного поля.

Коэрцитивная сила H_c — это размагничивающее поле, которое необходимо приложить к намагниченному образцу, для того чтобы индукция в нем стала равной нулю.

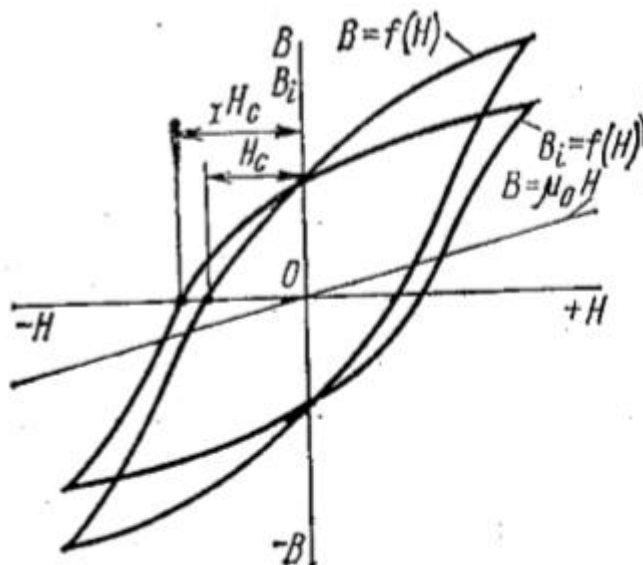


Рисунок 1.6 Петли гистерезиса в координатах

Потери на гистерезис, отнесенные к единице объема вещества (удельные потери) :

$$p_r, \text{ Дж/м}^3 = \int H dB. \quad (1.4)$$

При перемагничивании материала с частотой f (Гц) потери на гистерезис

$$p_r, \text{ Вт/кг} = f \int H dB / \gamma, \quad (1.5)$$

где γ – плотность материала, кг/м^3 .

Магнитотвердые материалы применяются для производства постоянных магнитов и классифицируют их по основному способу получения материала.

Поэтому давайте рассмотрим основные группы:

1) Литые магнитотвердые материалы

К ним относятся сплавы Fe—Ni—Al (ални) и Fe—Ni—Co—Al, Их магнитные характеристики: H_c 30-110 кА/м, удельная магнитная энергия W_m 3-30 кДж/м³.

2) Магнитотвердые ферриты

Магнитотвердые ферриты - это ферримагнетики с большой кристаллографической анизотропией. Применяются феррит бария $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$, феррит кобальта $\text{CoO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ и феррит стронция $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$.

Магнитные свойства магнитотвердых ферритов: H_c — 120-240 кА/м, W_m — 3-18 кДж/м³.

3) Сплавы с редкоземельными металлами

Наибольший интерес представляют соединения RC_{05} и R_2C_{017} , где R — редкоземельный металл (самарий, празеодим, церий). Магнитные свойства материалов на основе РЗЭ $H_c = (560-800)$ кА/м, $W_m = (56-80)$ кДж/м³.

4) Композиционные магнитотвердые материалы

Композиционными называют материалы, полученные из двух или более компонентов. Один компонент (матрица) образует непрерывную фазу, другой является наполнителем.

Постоянные магниты, которые делают из смеси магнитного порошка и полимерных связующих называют магнитопластами. Есть возможность изготовления сложных форм так как они поддаются механической обработке, благодаря пластичности (как резина), методом литья под давлением.

Преимуществом магнитопластов перед спеченными магнитами являются более простая, доступная и дешевая технология производства, их стойкость к коррозии и большой срок службы. От состава порошка и его содержание начальной смеси зависят магнитные характеристики получаемого магнитопласта.

Все магнитные наполнители которые применяются, характеризуются высокой твердостью, и их измельчение сопряжено со значительными трудностями. Наибольшей эффективностью обладают частицы продолговатой формы, обеспечивающие более высокий уровень намагничивания. Чтобы магнит был намагничен до насыщения, необходимо выполнять условие:

$$H_{max} = 3 \div 5 H_c. \quad (1.6)$$

Из этого получаем значения для каждой группы материалов:

Литые магнитотвердые материалы: 150 ÷ 550 кА/м;

Магнитотвердые ферриты: 360 ÷ 1200 кА/м;

Магнитные сплавы на основе редкоземельных элементов: 1740 ÷ 4000 кА/м

Из этого можно сделать вывод что рассмотренные материалы выше, необходимы для понимания процессов, происходящих в магнитотвердых материалах, что позволяет в дальнейшем выбрать оптимальный режим намагничивания.

2. Устройства для намагничивания магнитотвердых материалов

2.1 Общие соображения по намагничиванию постоянных магнитов

Существует намагничивание образцов из магнитотвердого материала и намагничивание магнитной системы, в состав которой входит не только постоянный магнит, но и другие элементы. В крайнем случае намагничивают не только сам магнит, а всю магнитную систему целиком (намагничивание после сборки). Это нужно для того, что после сборки системы индукция в магните, а, следовательно, и в рабочем зазоре повышается (см. рис. 1.1). Надо еще учесть то что с предварительно намагниченным магните будет сложно собрать систему.

Понятно, что в большинстве случаев оптимальным является намагничивание магнита до насыщения, то есть свойства должны определяться предельной петлей гистерезиса. Опытные данные рекомендуют выбирать максимальное поле намагничивания согласно (1.6), однако существуют и другие рекомендации [5]. Гост 8.268-77 рекомендует в качестве H_{max} выбрать такое поле, уменьшение которого на 25% не приводит к уменьшению остаточной индукции B_r и коэрцитивной силы H_c больше чем на 1%. Таким образом, выбор H_{max} определяется свойствами самого магнитотвердого материала. Однако надо помнить, что помимо значения H_{max} нужно учитывать и конфигурацию постоянного магнита (его форму, направление магнитной текстуры и т.п.).

Исходя из вышесказанного, для исследования свойств самого широкого спектра современных магнитотвердых материалов необходимы намагничивающие поля от 50÷10000 кА/м. Продолжительность намагничивания диктуется экранирующим действием вихревых токов, влияющих на процесс намагничивания и колеблется в пределах от единиц микросекунд до единиц миллисекунд. Минимальную продолжительность воздействия намагничивающего поля H_{max} можно оценить как:

$$t = 6.4 \gamma \frac{B}{H} D^2 \cdot 10^{-9}, c$$

где B – индукция в магните, Тл;

H – напряженность намагничивающего поля, кА/м;

γ – удельная электрическая проводимость материала магнита, См

D – эффективный диаметр магнита, м.

2.2 Классификация намагничивающих устройств

Намагничивание магнитов и магнитных систем проводят в специальных намагничивающих установках и устройствах.

В основном применяют намагничивающие установки постоянного тока (электромагниты, соленоиды) и импульсные установки.

2.2.1 Намагничивающие установки на постоянном токе.

Электромагниты

На заводах, которые выпускают постоянные магниты для их намагничивания используют устройство – пермеаметр, это своего рода электромагнит. Так как задачей является намагничивание, то мы рассмотрим пермеаметры как устройства намагничивания.

Основными частями пермеаметра являются ярмо, намагничивающие катушки и устройства для определения напряженности магнитного поля и индукции.

Ярмо пермеаметра служит для создания (вместе с образцом) замкнутой (или близкой к замкнутой) магнитной цепи. Схематическое устройство пермеаметра показано на рисунке 2.1.

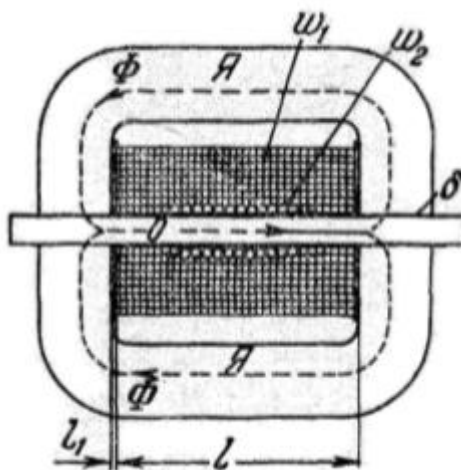


Рисунок 2.1. Устройство пермеаметра.

Я — ярмо из магнитномягкого материала;

О — образец;

ω_1 — намагничивающая обмотка;

ω_2 — измерительная обмотка индукции.

Если рассчитать магнитную цепь пермеаметра то из нее следует, что определение напряженности намагничивающего поля по току в намагничивающей обмотке возможно при соблюдении следующих условий:

1) Намагничивающая катушка должна покрывать всю часть образца между полюсами ярма.

2) Воздушный зазор между полюсами ярма и образцом должен быть как можно меньше и образец должен касаться ярма всей торцевой поверхностью.

3) Сечение ярма пермеаметра и проницаемость материала, из которого оно изготовлено, должны быть значительно больше сечения и проницаемости образца.

Намагничивающие обмотки расположены на П-образных половинах ярма Я. Образец закладывается между двумя вставками С (рис. 2.2). Кроме приведенных обозначений, на рис. 2.2 указаны:

О — образец;

ω_1 — намагничивающие катушки;

ω'_2 и ω''_2 — катушки для измерения напряженности поля.

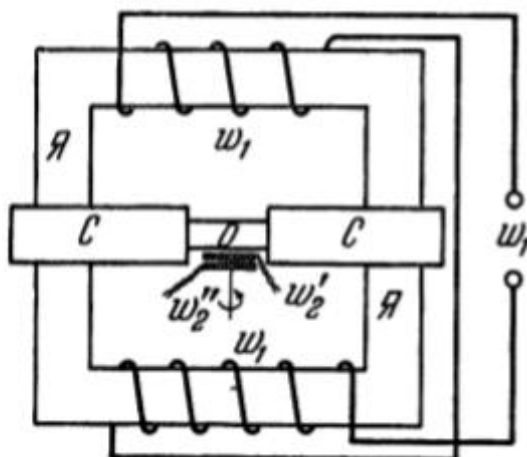


Рисунок 2.2. Устройство пермеаметра с двумя катушками поля

Есть устройства с катушками намагничивания, в которых большие магнитные поля возможно получить с помощью применения не до конца замкнутых ферромагнитных магнитопроводов (пермеаметры). Самым похожим к предлагаемому решению является пермеаметр, который содержит магнитопровод с зазором для установки образца и обмотку намагничивания, которая состоит из двух катушек, которые расположены симметрично относительно зазора магнитопровода. В нем образец материала испытывается в условиях «не полностью замкнутой магнитной цепи», когда между образцом и полюсами магнитопровода есть неоднородность магнитного поля в зазоре между полюсами магнитопровода. Большим недостатком пермеаметров для постоянных магнитов является их громоздкость. Для создания больших полей необходима значительная намагничивающая сила, которая может достигать значения в некоторых пермеаметрах до сотен тысяч ампер. Для размещения обмотки и создания нужной однородности поля в рабочем зазоре приходится увеличивать размеры пермеаметра и применять источники питания большой мощности.

Все электромагниты отличаются друг от друга формой, размерами и местом расположения намагничивающей обмотки. Схематическое устройство простого электромагнита показано на рис. 2.3. Чем выше индукция в зазоре электромагнита, тем меньше КПД его обмотки. Тут условно КПД обмотки электромагнита мы называем процентное отношение намагничивающей силы, приходящейся на воздушный зазор (напряженность поля в зазоре, умноженная на его длину), к полной намагничивающей силе обмотки.

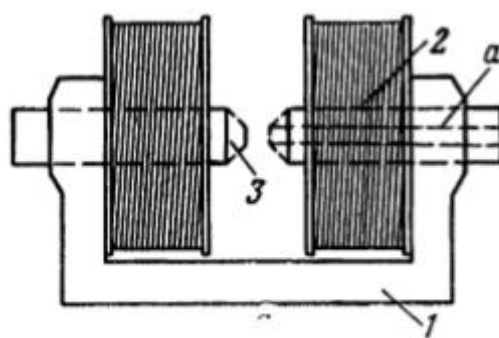


Рисунок 2.3. Схематическое устройство электромагнита

- 1 – магнитопровод,
- 2 – намагничивающая обмотка,
- 3 – полюсные наконечники.

Наибольший КПД электромагнитов составляет 30—35%. Например, при напряженности поля 4000 А/см в зазоре длиной 100—150 мм и диаметре полюсов электромагнита 150 мм КПД составляет не более 25—30%.

Рассмотрим пример электромагнита для создания наибольших напряженностей поля. В электромагните простой формы с сердечником из мягкой стали с диаметром полюсов 80 мм и длиной 350 мм можно в зазоре 25 мм получить напряженность поля 12—13 тыс. А/см, а в зазоре 12,5 мм — до 17000 А/см. Намагничивающаяся сила обмотки около 60000 А. Увеличения напряженности поля в электромагните можно получить если изготовить полюса из пермендюра (сплав железа, кобальта и ванадия) и придать наконечникам коническую форму, как показано на рис. 2.3 пунктиром. Такие изменения позволят получить в зазоре 12,5 мм напряженность поля до 20000 А/см. Большие напряженности поля можно получить лишь за счет увеличения размеров самого магнитопровода электромагнита.

Дугообразные магниты не очень удобно намагничивать в электромагнитах, так как при этом магнитная проводимость между полюсами электромагнита, сближенными на расстояние, равна расстоянию между ножками дугообразного магнита, может быть больше, чем проводимость по магниту, и поэтому магнит не намагнитится до насыщения. Магниты таких форм намагничивают с помощью системы плоских намагничивающих катушек, по которым кратковременно (доли секунды) через плавкий предохранитель, так чтобы катушки не успели сильно нагреться, пропускают большой постоянный ток [6]. В некоторых случаях форма магнита или магнитной системы не позволяет намагничивать его обычными методами — в электромагните или с помощью намагничивающих катушек. Поэтому намагничивание происходит с помощью одного провода большего сечения, проходящего в центре всей магнитной системы. Поэтому для намагничивания постоянных магнитов требуются поля

порядка нескольких тысяч ампер на сантиметр; следовательно, при намагничивании одним проводом по постоянному магниту должен идти ток в десятки тысяч ампер.

2.2.2 Импульсные намагничивающие установки

Одним из способов намагничивания систем с постоянными магнитами является способ импульсного намагничивания. В этом случае производится накопление энергии каким-либо накопителем. При достижении определенного уровня вся эта энергия передается в цепь намагничивающей катушки. Такой способ позволяет создать кратковременный импульс тока порядка нескольких десятков килоампер.

Ему присуще несколько особенностей, которые заключаются в следующем:

- Возможно применять сильные намагничивающие поля с малыми энергетическими затратами;
- Кратковременность воздействия импульсного поля на образец;
- Нагрев ПМ с высокой удельной проводимостью вследствие возникновения вихревых токов;
- Возможность применения простых индукторных систем, реализующих намагничивание ПМ;

Проблема генерации мощных импульсов тока для получения сильных магнитных полей в целях намагничивания ПМ в первую очередь сводится к созданию подходящих источников энергии, которые должны:

- запастись необходимой энергиею;
- преобразовывать и передавать энергию при малых потерях;
- создавать значительный импульс тока;

Учитывая эти требования, в качестве системы питания для намагничивающей установки, может использоваться ограниченный тип электротехнических устройств (рис. 2.4)

Для того что бы постоянный магнит обладал максимальной энергией и стабильными характеристиками, он должен быть намагничен до состояния насыщения.

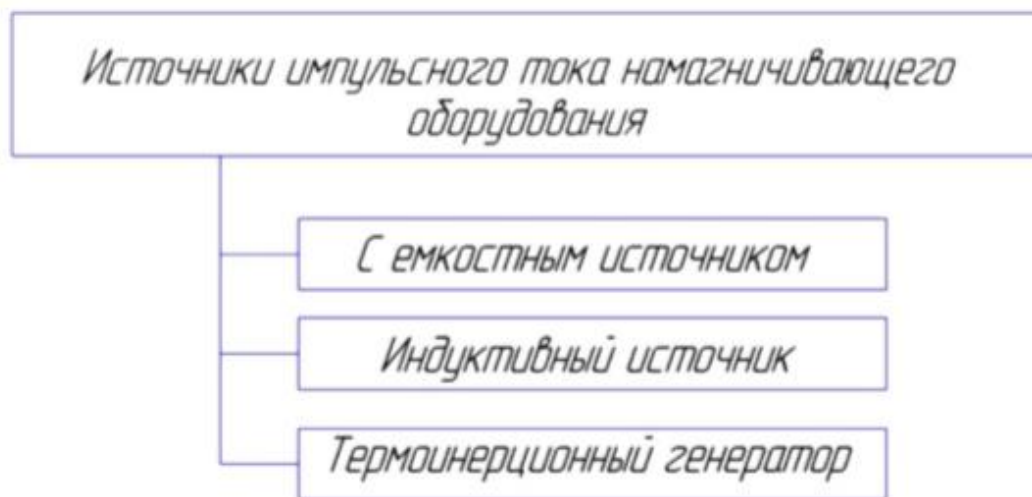


Рисунок 2.4 Классификация источников импульсного тока

Как видно из рисунка 2.4, электрическая энергия может быть накоплена и преобразована в источниках энергии различных типов.

Применяют как стационарные, так и наматываемые непосредственно на намагничиваемый магнит катушки, как с магнитопроводом, так и без него. Намагничивающий ток достигает десятков и сотен тысяч ампер. К преимуществам импульсных установок относятся малые размеры, масса, небольшая потребляемая мощность. Можно добавить, что по данным испытаний завода изготовителя постоянных магнитов, именно импульсный метод позволяет осуществить их полное промагничивание.

Из этого можно сделать вывод что импульсный метод намагничивания постоянных магнитов является универсальным и пригоден для большого количества магнитотвердых материалов.

3. Разработка импульсной намагничивающей установки конденсаторного типа.

3.1 Основы проектирования импульсных установок.

Как было рассмотрено выше, электрическая энергия может быть накоплена и преобразована при использовании различных видов накопителей. Рассмотрим каждый из них подробнее.

Конденсаторные батареи

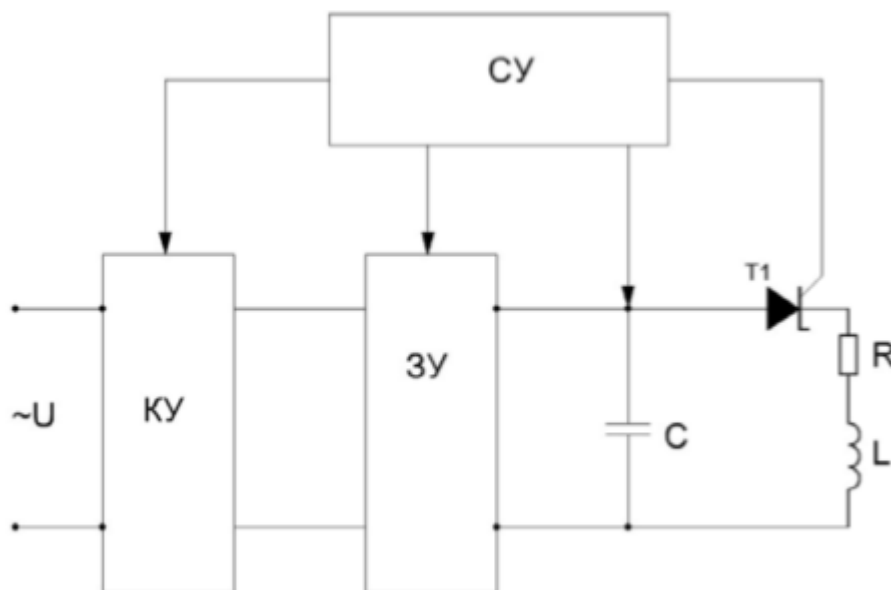


Рисунок 3.1 Структурная схема конденсаторной намагничивающей установки

На рисунке 3.1:

КУ – коммутирующее устройство,

ЗУ – зарядное устройство,

СУ – схема управления,

Т1- коммутатор (тиристор).

Что касается перспектив увеличения энергоемкости конденсаторов, то существуют прототипы конденсаторов на энергию в 100 МДж, но следует учитывать тот факт, что с ростом величины емкости удельная стоимость будет так же увеличиваться.

Индуктивные накопители

Использование катушек индуктивности при накоплении больших энергий, составляющих несколько мегаджоулей и длительностью разрядного импульса в несколько миллисекунд, имеет ряд преимуществ перед другими накопителями энергии. Обратимся к схеме, представленной на рисунке 3.2, в которой накопление энергии происходит при заряде катушки индуктивности от источника тока. При достижении определенной энергии зарядная цепь размыкается ключом K_1 , а ключом K_2 подключается нагрузка, на которую накопитель разряжается.

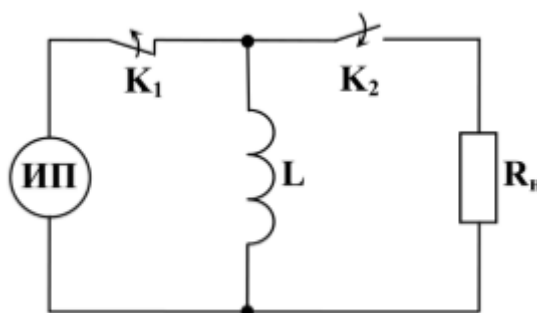


Рисунок 3.2 Схема индуктивного накопителя

Использование индуктивных накопителей энергии, позволяет достигать высоких значений плотностей энергий при этом обеспечить небольшую их стоимость. В сравнении с конденсаторными батареями, у которых наблюдается удорожание удельной стоимости при росте величины накопленной энергии, у индукторных систем происходит наоборот удешевление, кроме того индукторные схемы накопителей имеют более лучшие массогабаритные показатели.

Так же индуктивные накопители при большом количестве достоинств имеют свои недостатки, например, из-за джоулевых потерь они не могут в течение длительного времени сохранять запасенную энергию [7]. Для того что бы зарядить индуктивный накопитель, за небольшой промежуток времени, необходимо увеличивать мощность зарядного устройства. По этой причине зарядка осуществляются, либо от преобразователей, питаемых от специальных трансформаторных подстанций, подключаемых к ЛЭП, либо от специальных

электрогенераторов ударной мощности с массивными роторами либо дополнительными маховиками, что в конечном итоге усложняют и ухудшают массогабаритные показатели и автономность самой намагничивающей установки в целом.

Импульсные генераторы

Из всех источников энергии, генерирующие мощные импульсы тока, лучшими являются генераторы импульсной мощности или импульсные генераторы (ИГ).

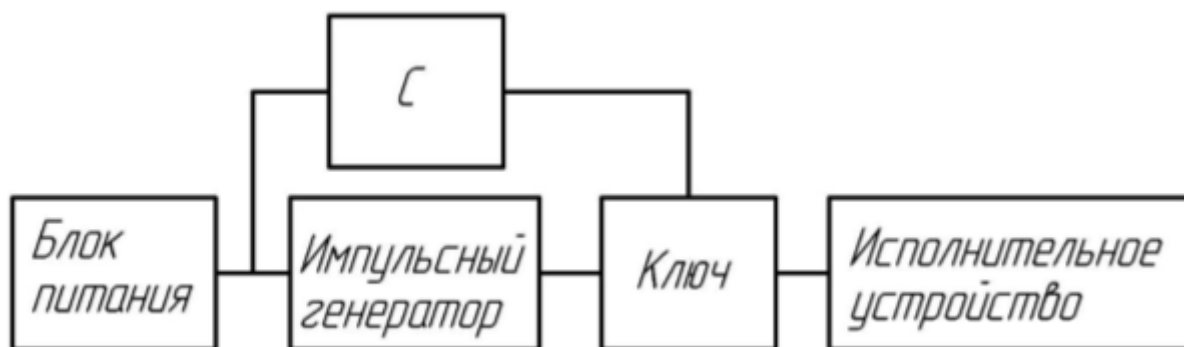


Рисунок 3.3 Структурная схема намагничивающей установки с ИГ

Использование ИГ в качестве источника тока, для НУ имеет явное преимущество по сравнению с другими источниками, данные преимущества заключаются в том, что: во-первых, импульсный генератор удобно включать в нагрузку при $t=0$, $E=0$, $i=0$ и удобно отключать, в тот момент когда ток в генераторе проходит через нулевое значение. На рисунке 3.3 представлена структурная схема установки с импульсным генератором. Для циклической работы НУ требуется, восполнять только незначительную часть энергии генератора, которые обусловлены электрическими и механическими потерями, а так же потерями в стали. Для этого в схему включен конденсатор небольшой емкости, который разряжается через ключ на исполнительное устройство, тем самым восполняя энергию потерь генератора. Нельзя забывать тот факт, что во время процесса намагничивания температура активных элементов ИГ, возрастает, и чем больше продолжительность работы и количество циклов, тем значительно растет их температура.

Учитывая специфику процесса намагничивания, которое происходит с длительностью в несколько миллисекунд то использование электрических машин импульсного действия имеет большие перспективы внедрения и практическую важность.

В разрабатываемой установке будем использовать батарею конденсаторов, поскольку она более предпочтительна, при одинаковой энергии с индуктивным накопителем позволяет создать малогабаритную установку и проще в конструкции чем импульсные генераторы. Современный уровень техники позволил использовать малогабаритные конденсаторы с большой емкостью для создания конденсаторных батарей, которые в установках такого рода определяют основные габариты.

На рисунке 3.4 представлена структурная схема, которая положена в основу реализации намагничивающих установок. Такая установка состоит из блока питания, накопителя энергии, чаще всего— конденсаторная батарея. При включении устройства происходит накопление энергии в конденсаторе до определенной величины, затем открывается ключ, и напряжение заряда батареи конденсатора прикладывается к намагничивающей обмотке.



Рисунок 3.4 Структурная схема намагничивающей установки

3.2 Поиск технических решений построения импульсных намагничивающих установок.

Прежде чем разрабатывать импульсную намагничивающую установку нам нужно установить необходимые параметры для создания импульсных полей, а также установить оптимальные условия работы установки. Основными параметрами импульсных намагничивающих полей можно считать амплитудное значение напряженности магнитного поля H_m , время нарастания τ_n и длительность импульса τ [10].

Рассмотрим случай, когда поле создается путем разряда конденсатора на намагничивающую обмотку через вентиль. Параметры разрядной цепи соответствуют колебательному характеру разряда. При этом мгновенное значение напряженности поля определяется выражением:

$$H = H_m e^{-bt} \sin \omega_0 t, \quad (3.1)$$

или

$$H = H_m e^{-bt} e^{-j\omega_0 t}, \quad (3.2)$$

где b – коэффициент затухания, а ω_0 – частота собственных колебаний разрядного контура.

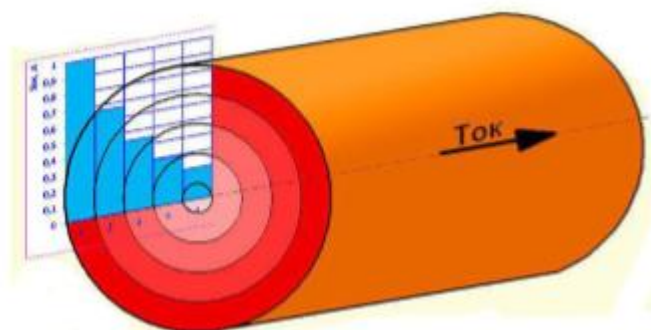


Рисунок 3.5 Распределение переменного тока по сечению стержня

Предположим, что в поле намагничивающей обмотки находится некоторая часть достаточно длинного массивного цилиндрического стержня кругового сечения с диаметром d из магнитотвердого материала. Магнитные линии поля прямолинейного стержня имеют форму концентрических окружностей (см рис. 3.5). Магнитное поле существует как внутри него, так и в пространстве, окружающем стержень.

При этом с учетом поверхностного эффекта можно получить выражения для амплитудного значения напряженности поля в теле стержня, охваченном намагничивающей обмоткой, в следующем виде:

$$H_m = A_0 J_0(X), \quad (3.3)$$

где A_0 – постоянная, $J_0(X)$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка. Аргумент X определяется уравнением:

$$X = \rho \sqrt{\mu \gamma (b - j\omega_0)}, \quad (3.4)$$

где ρ – расстояние от оси цилиндра по радиусу; μ – магнитная проницаемость; γ – электропроводность материала цилиндра.

Постоянная A_0 находится из граничных условий. При $\rho=0$ $X=0$, $J_0(X)=1$ и $H_m = A_0$, где H_{m0} – напряженность поля на оси цилиндра. Следовательно,

$$H_m = H_{m0} J_0(X), \quad (3.5)$$

Подставляя в (3.4) $\rho = \frac{d}{2}$, определяем напряженность поля на поверхности цилиндра:

$$H_{me} = H_{m0} J_0(X_e), \quad (3.6)$$

Где

$$X_e = \frac{d}{2} \sqrt{\mu\gamma b - \omega_0}.$$

Модуль X_e равен:

$$X_e = x_e = \frac{\mu\lambda}{4} \sqrt{b^2 - j\omega_0}, \quad (3.7)$$

Выразим ω_0 , b через τ_H и τ , тогда

$$\omega_0 = \frac{\pi}{\tau}; \quad b = \frac{\pi}{\tau} \operatorname{ctg} \pi \frac{\tau_H}{\tau}, \quad (3.8)$$

Учитывая (3.8), уравнение (3.7) принимает вид:

$$x_e = d \frac{\mu\gamma\lambda}{4} \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \pi \frac{\tau_H}{\tau}}, \quad (3.9)$$

Выражение (3.6) можно представить следующим образом:

$$H_{me} = H_{m0} b_0 e^{j\beta_0}, \quad (3.10)$$

где b_0 – модуль, а β_0 – аргумент комплексного числа $J_0(X_e)$.

Модуль b_0 зависит от модуля аргумента x_e и для рассматриваемого случая показывает, во сколько раз напряженность поля на поверхности превышает напряженность поля на оси цилиндра [10].

Для намагничивания магнитотвердых материалов в постоянных магнитных полях ГОСТ 17809-72 требует, чтобы напряженность поля превышала в пять раз величину коэрцитивной силы H_c материала,

следовательно, для промагничивания цилиндрического образца в импульсных полях необходимо чтобы $H_{m0} \geq 5H_c$.

Из вышесказанного следует, что

$$b_0 = \frac{H_{me}}{H_{m0}} = \frac{H_{me}}{5H_c} = f \cdot d \cdot \frac{\mu\gamma\lambda}{4} \sqrt{1 + ctg^2 \pi \frac{\tau_n}{\tau}}, \quad (3.11)$$

Как можно заметить из выражения (3.11), модуль b_0 и напряженность поля для данного материала и диаметра цилиндра d зависят от времени нарастания τ_n и длительности τ импульса. Величины τ_n и τ можно получить из решения системы дифференциальных уравнений, составленной для электрической схемы, соответствующей схеме замещения разрядной цепи. Основная трудность при построении последней заключается в выборе схемы замещения намагничивающей обмотки с массивным сердечником. Если емкость разрядного конденсатора известна, то для данного намагничиваемого образца, задаваясь различным числом витков ω намагничивающей обмотки, можно построить зависимости $\tau_n = \varphi(\omega)$, $\tau = \varphi(\omega)$, а следовательно, из (3.11) с учетом (3.7) и $b_0 = F(\tau)$.

Однако функция $b_0 = F(\tau)$, имеющая вид гиперболы, не определяет оптимальные соотношения между величиной напряженности поля H_{me} и его длительностью. Они могут быть получены с помощью функции $b_{0\tau} = F1(\tau)$, которая представлена на рисунке 3.6.

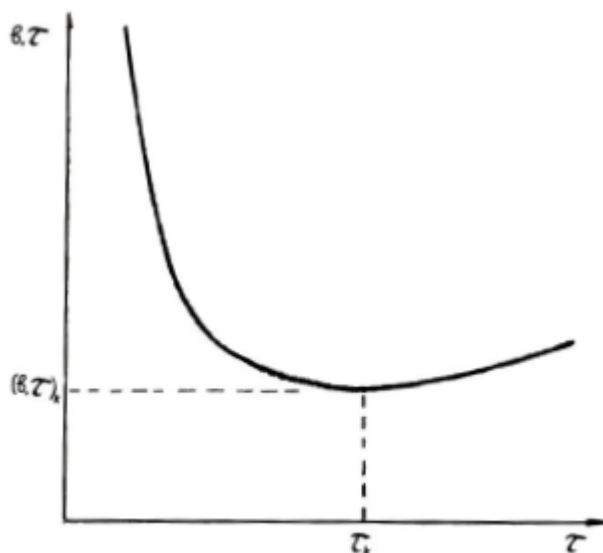


Рисунок 3.6 Зависимость функции $b_{0\tau}$ от длительности импульса τ

Очевидно, что величина $(b_{0\tau})_k$, которой соответствуют найденные значения Hme и τ_k , является оптимальным параметром для определения требуемого значения Hme и τ при импульсном намагничивании данного образца. Из графика $\tau = \varphi(\omega)$ по рассчитанному τ_k можно найти оптимальное число витков ω_k . Если коэффициент затухания $b \ll \omega_0$, что часто встречается на практике, тогда уравнение (3.7) примет вид:

$$x_e = d \frac{\mu \gamma \pi}{4\tau}. \quad (3.12)$$

Предложенный метод определений оптимальных параметров импульсного намагничивающего поля можно применить и для цилиндрических магнитов конечных размеров. В этом случае поле будет определено с некоторым запасом, поскольку для конечных образцов поле проникает и с торцевых сторон.

Таким образом, при импульсном намагничивании постоянных магнитов в качестве критерия оптимальных параметров импульсного намагничивающего поля следует принять $(b_{0\tau})_k = \left(\frac{Hme}{5Hct}\right)_k$, при определенном значении длительности импульса $\tau = \tau_k$. Прежде чем приступить непосредственно к разработке намагничивающей установки, следует ознакомиться с уже существующими для того чтобы определить основные тенденции развития таких устройств,

проанализировать существующий уровень техники, иными словами узнать достигнутые оптимальные параметры процессов, устройств. Нахождение технических решений известных устройств поможет облегчить проектирование нового, а также избежать ошибок и недостатков.

Обратимся к статье авторов А.А. Преображенского и Р.Д. Работнова, «Малогабаритная установка для импульсного намагничивания постоянных магнитов», опубликованной в научном журнале «Известия Вузов» [11]. В данной статье описана установка, даны рекомендации по ее проектированию и результаты испытаний. Установка позволяет получать максимальное значение тока в импульсе до 20 кА. Рассмотрим, предложенную авторами принципиальную схему, изображенную на рисунке 3.7.

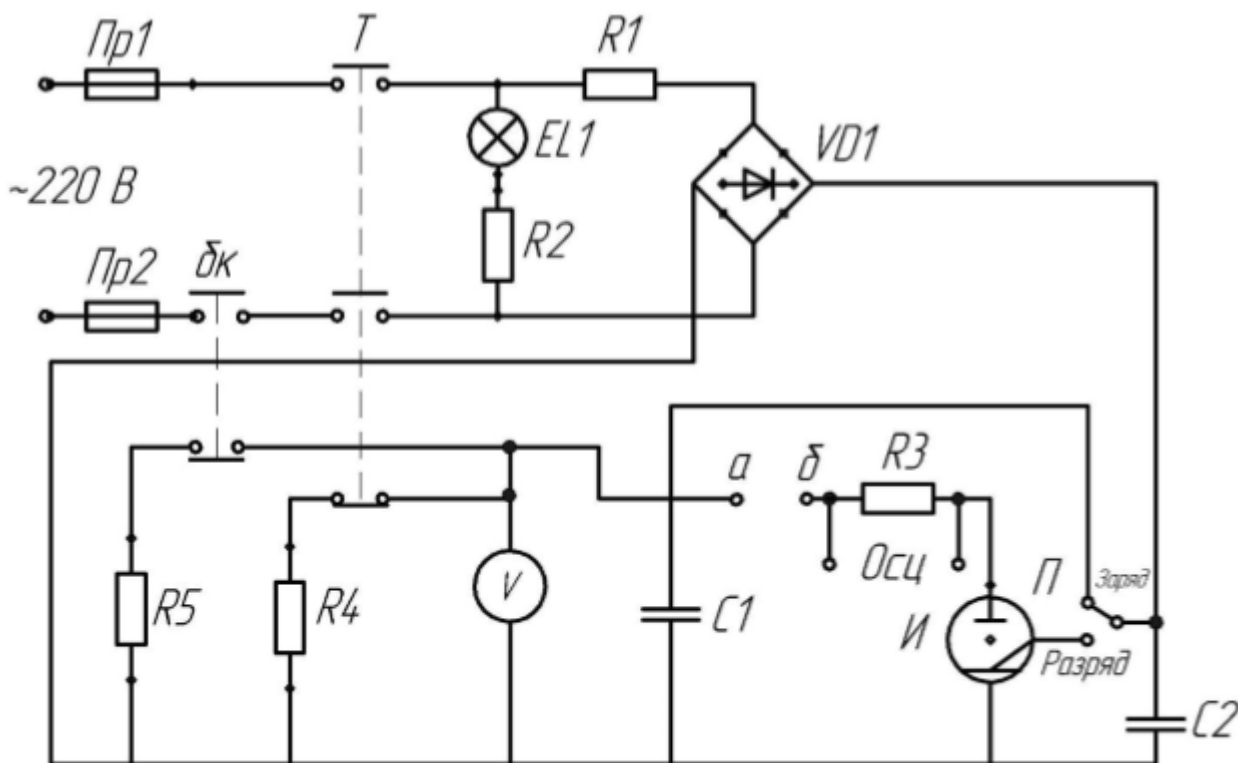


Рисунок 3.7 – Принципиальная схема установки

Назначение отдельных элементов и работа устройства заключается в следующем.

Намагничивающая обмотка, данные которой определяются конкретной магнитной системой, подключается к массивным латунным зажимам а, б. Заряд накапливается в батарее электролитических конденсаторов $C1 = 8000$ мкф. В

исходном состоянии переключатель П (в установке использован переключатель пакетного типа) ставят в положение «Заряд» [11].

Включением переключателя питания Т подают напряжение через выпрямитель В и ограничительное сопротивление R1 на емкости С1 и С2. Емкость С2 служит для поджигания игнитрона И. Одновременно с этим к С1 подключается магнитоэлектрический вольтметр V, измеряющий текущее напряжение заряда. Для контроля наличия напряжения предусмотрена сигнальная лампа Л, включающаяся через сопротивление r2. Процесс заряда длится 4—5 с, в течение которых конденсаторы заряжаются до 200 В. После окончания заряда переключатель П ставят в положение «Разряд». При этом под действием напряжения заряда конденсатора С2 игнитрон зажигается и происходит разряд батареи С1 в цепи намагничивающей обмотки. Для измерения величины этого импульса предусмотрено сопротивление R3, напряжение с которого подается на осциллограф.

В процессе эксплуатации авторами установки было выявлено, что после намагничивания батарея С1 может сохранять остаточное напряжение, достигающее 20 В. Для устранения этого напряжения после выключения питания предусмотрено сопротивление R4. Безопасность ремонта и обслуживания установки обеспечивается пружинным блок-контактом БК, включающим питание, а также снимающим остаточный заряд посредством сопротивления r5. Блок-контакт выключается при вынимании прибора из наружного защитного корпуса. Габариты установки 340×350×480 мм³; вес 20 кг; максимальный ток $I_{\max}=20000$ А; длительность импульса $T=0.3$ мс; ток потребления $I=1,5$ А [11].

На рисунке 3.8 представлена эквивалентная электрическая схема устройства. Авторы статьи утверждают, что расчет схемы затруднен, прежде всего тем, что параметры r и L в значительной степени определяются в каждом отдельном случае использования устройства данными намагничивающей обмотки и магнитной системы.

В зависимости от соотношений между r , L , C разряд конденсатора в цепи может иметь периодический или аperiodический характер. С точки зрения получения максимума тока более выгодным является периодический режим. Однако экспериментальное исследование установки показало, что в этом случае возникает отрицательная полуволна. Существование этой полуволны нежелательно как с точки зрения получения высокого качества намагничивания, так и для долговечной нормальной работы игнитрона. Кроме того, малое время импульса вызовет быстрое затухание электромагнитной волны в материале магнита и приведет к ухудшению качества намагничивания. Поэтому наиболее целесообразной областью использования схемы следует считать ее работу в периодическом режиме, не слишком удаленном от критического. Математически наиболее просто произвести расчет схемы для критического случая.

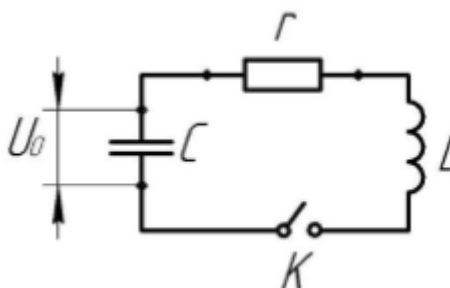


Рисунок 3.8 – Эквивалентная электрическая схема намагничивающей установки
Для работы в критическом режиме необходимо выполнить условие

$$r = 2 \sqrt{LC}.$$

Максимальное значение тока в цепи

$$I_{\max} = 0.735 U_0 / r, \quad (3.13)$$

Выбирая $I_{\max} = 20000$ А, $U_0 = 200$ В, по формуле (2) получим $r = 0.00735$ Ом. Ток достигает максимального значения через промежуток времени t_{\max} , который определяется по формуле:

$$t_{\max} = 2L/r, \quad (3.14)$$

t_{\max} можно также определить на основании следующих рассуждений.

Необходимо, чтобы при намагничивании весь объем магнита пронизывался

магнитным полем. Минимальная продолжительность T импульса, при котором это условие выполняется, может быть найдена из следующего выражения:

$$T=6.4\gamma\frac{B}{H}D^2\cdot 10^{-9}, \text{ с} \quad (3.15)$$

где B – индукция в магните, Тл; H – напряженность намагничивающего поля, кА/м; γ – удельная электрическая проводимость материала магнита, См D – эффективный диаметр магнита, м.

Выбирая $B=1.2$ Тл; $\gamma=1.7\cdot 10^4$ См (материал типа алнико); $H=700$ кА/м; $D=0.04$ м, по формуле (4) получим $T=300$ мкс.

Анализ формы импульса, записанного на осциллограмме, позволяет считать, ввиду крутого переднего фронта волны, что $t_{\max} \approx 0.2 T=60$ мкс.

Далее из формул (3) и (1) находят, что $L=0.22$ мкГн, $C=8000$ мкФ.

Реально получаемые величины r , L и T могут весьма существенно отличаться от расчетных значений. Приведенный расчет позволяет определить только порядок этих величин.

Расчет остальных элементов схемы – цепи заряда батареи конденсаторов, сопротивлений, выбор вольтметра и игнитрона не имеет принципиального значения и является обычным. Установка использовалась для намагничивания магнитных систем электроизмерительных приборов. При этом применялись разные виды намагничивающих обмоток и приспособлений.

Рассмотрим патент № 1684817 А1 «Устройство для импульсного намагничивания постоянных магнитов» [12] Целью этого изобретения является упрощение устройства. Схема этого устройства представлена на рисунке 3.9. Оно содержит в составе источник постоянного тока 1, накопитель энергии (конденсатор) 2, зарядный резистор 3, кнопки заряда 4 и разряда 5, ограничительный резистор 6, импульсный трансформатор 7, диод 8, управляемый тиристор 9, намагничивающая обмотка 10, компенсирующая обмотка 11 переменный резистор 12.

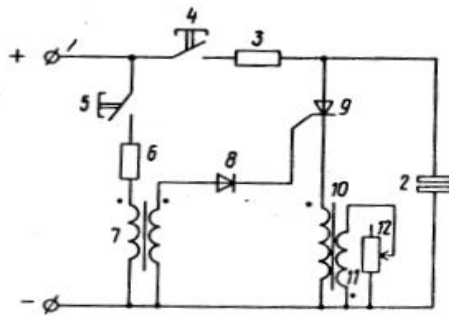


Рисунок 3.9 – Электрическая схема предлагаемого устройства

Устройство работает по следующему принципу. При нажатии на клавишу 4 происходит заряд батареи конденсаторов до значения U_n (см рис. 3.9). В определенный момент времени t_0 при замыкании кнопки 5, с помощью импульсного трансформатора 7 генерируется единичный импульс напряжения положительной полярности, который открывает при помощи диода 8 вместе с тиристором 9. При этом напряжение заряда батареи конденсаторов 2 переходит к намагничивающей обмотке 10 и в интервале времени $t_0 - t_1$ происходит спад напряжения U_n до нуля и возрастание напряжения намагничивающего тока I_n от нуля до максимального значения. При этом напряжение U_n опережает ток нагрузки I_n по фазе на угол 90 градусов ввиду наличия контура LC. В промежутке времени $t_1 - t_2$ происходят процессы самоиндукции и индукции [5]. В таком случае ЭДС самоиндукции переходит к батарее конденсаторов 2 обратной полярностью и тем самым в момент времени t_2 напряжение перезаряда доходит до максимального значения, а ток I_n через намагничивающую обмотку 10 уменьшается до нуля.

В то же время t_1 происходит процесс индукции в компенсирующей обмотке 11 и напряжение U_k растет до максимальной величины в момент времени t_2 . Затем в промежутке времени $t_2 - t_3$ происходит падение напряжения U_n перезаряда конденсаторов от наивысшей величины до нуля. А в промежутке времени $t_3 - t_4$ происходит снижение обратной полуволны намагничивающего тока до нуля и тока компенсирующей обмотки 11 также до нуля. Исходя из вышесказанного, в промежутке времени $t_2 - t_4$ происходит модуляция всплеска отрицательной полуволны намагничивающего тока I_n и

положительной полуволной компенсирующего тока I_k , из-за чего исключен размагничивающий фактор.

В авторском свидетельстве под № 1522302 А1 «Устройство для намагничивания и размагничивания постоянных магнитов» задачей изобретения является упрощение устройства и повышение удобства эксплуатации [15]. На рисунке 3.10 изображена структурная схема устройства. Устройство для намагничивания и размагничивания состоит из цепи заряда, состоящую из соединенных последовательно блока 1 управления зарядом трансформатора 2, выпрямителя 3, батареи конденсаторов 4, цепь разряда, состоящую из соединенных последовательно пускового блока 5, блока 6 управления разрядом, тиристора 7 разряда, балластной индуктивности 8 и индуктора 9, а также схему 10 сравнения и переключатель 11 между намагничиванием и размагничиванием [15]. Устройство работает в циклическом режиме. Первый цикл заключается в заряде и подзарядке батареи 4, а второй цикл – разряд батареи 4. В начальном положении устройства батарея конденсаторов разряжена, на вход 47 компаратора 27 схемы 10 сравнения с помощью делителя (резисторы 29, 30) подается опорное напряжение, на выходе компаратора 27, есть высокий уровень и лампа 34 оптрона 28 светит, освещая фоторезисторы 35 и 36. Сопротивление фоторезисторов 35 и 36 падает и поэтому тиристор 16 блока 1 управления зарядом открыт, а база транзистора 22 пускового блока 5 зашунтирована малым сопротивлением фоторезистора 35 и транзистор 22 закрыт, тем самым прекращается цикл разряда. При поступлении на вход 17 переменного напряжения через блок 1 на трансформатор 2, оно выпрямляется выпрямителем 3 и заряжается батарея конденсаторов 4. Вместе с зарядом батареи 4 растет напряжение, идущее на делитель (резисторы 31 и 32). Затем, когда напряжение на входе 46 компаратора 27 превзойдет опорное напряжение на входе 47, компаратор 27 перейдет в другое положение, в следствие чего тиристор 16 закроется и процесс заряда батареи закончится.

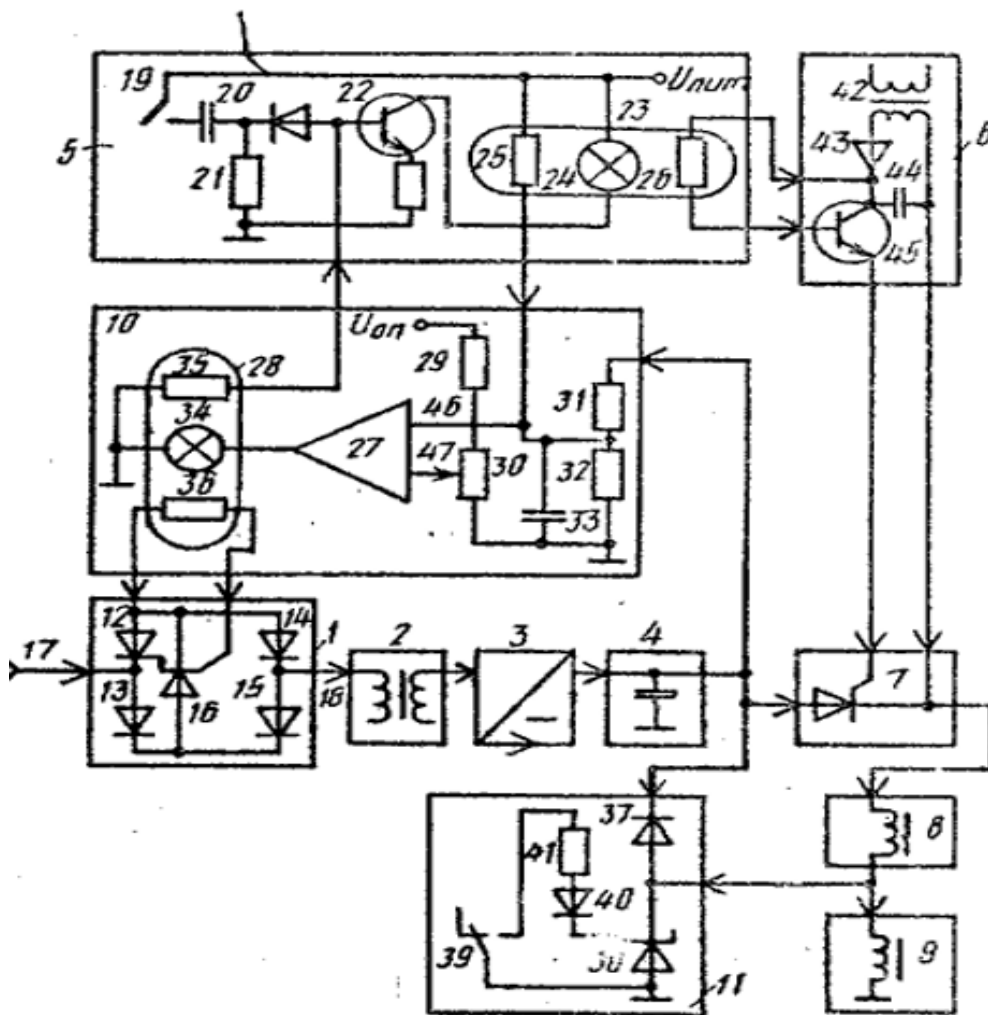


Рисунок 3.10 – Структурная схема устройства

Второй цикл работы устройства происходит следующим образом. При замыкании переключателя 19 пускового блока 5 начинается заряд емкости 20 через резистор 21, таким образом появляется импульс малой длительности, который на небольшое время открывает транзистор 22 и включает лампу 24 оптрона 23. Падение сопротивления фоторезистора 26 приводит к открытию транзистора 45 блока 6. Напряжение вторичного источника, состоящего из трансформатора 42, диода 43 и конденсатора 44, поступают к управляющему входу тиристора 7 разряда, и он открывается. Батарея конденсаторов 4 разряжается.

Режим размагничивания будет происходить при разомкнутом переключателе 39 блока 11. Разряд батареи совершается также, как в режиме намагничивания.

Рассмотрим следующее авторское изобретение и представим его описание. В патенте №1410114 А1 «Намагничивающее устройство» целью изобретения является повышение эффективности намагничивания, упрощение и сокращение габаритов устройства [16]. На рисунке 3.11 изображена принципиальная схема устройства. Устройство содержит в себе источник трехфазного напряжения 1, трехфазный мостовой выпрямитель 2, оснащенный трехфазной группой тиристоров 3, которые используются в качестве ключей управления. К выходу мостового выпрямителя 2 подсоединены электромагнит для намагничивания и блок зарядных конденсаторов. Электромагнит выполнен с двумя идентичными катушками 4 и 5, включенными согласно по отношению к друг другу, а блок конденсаторов сделан в виде двух равных групп конденсаторов 6 и 7. Катушки 4 и 5 и ряд конденсаторов 6, 7 соединяются между собой по схеме четырехплечевого моста 8 [16]. В диагональ четырехплечевого моста 8 включен диод 9 в непроводящем для групп конденсаторов 6 и 7 направлении.

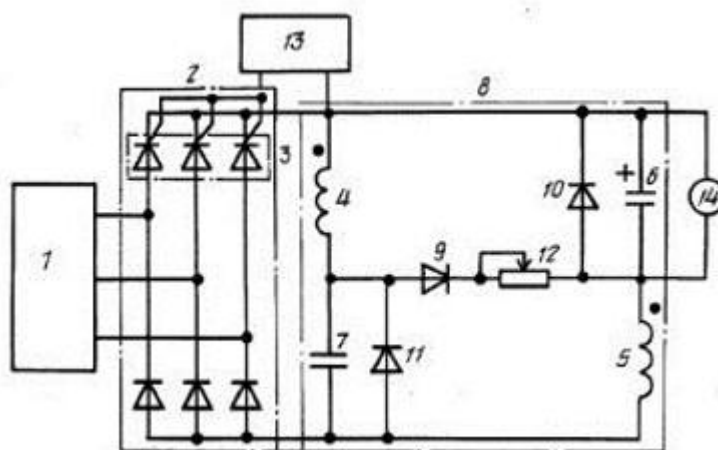


Рисунок 3.11 – Принципиальная схема намагничивающего устройства

Тогда конденсаторы группы 6 и 7 зашунтированы обратными диодами 10, 11. Последовательно с диодом 9 в диагональ моста 8 может быть включен регулируемый резистор 12. Управление трехфазной группой тиристоров 3 происходит от блока управления 13, который может быть сделан в виде трансформатора. Рассмотрим каким образом работает устройство. При подводе управляющего импульса с блока 13 на трехфазную группу тиристоров 3,

совершается их открывание и к каждой из катушек 4 и 5 электромагнита прикладывается полное напряжение, исходящее с трехфазного моста 2. Первоначально ток в катушках 4 и 5 постепенно растет от нуля до некоторого максимального значения, затем по мере заряда групп конденсаторов 6, 7 совершается его постепенное убывание. Аналогично изменению тока в катушках 4 и 5 совершается изменение магнитного потока, который действует на намагничиваемый образец или изделие.

Когда ряд конденсаторов 6, 7 зарядятся до половины значения напряжения, их зарядка останавливается. С этого момента, в точке б на рисунке 3.9 диод 9 открывается и катушки 4, 5 получают питание через диагональ четырехплечевого моста 8, конкретно через диод 9 и резистор 12. При этом поскольку катушки 4 и 5 включены последовательно, то значение тока сохраняется, в следствие чего устанавливается режим тока и магнитного потока, действующий на магнит или другой образец. После отключения управляющего импульса тиристоры 3 закрываются и группа конденсаторов 6, 7 начинают разряжаться до нуля. Во время этого процесса магнитный поток спадает. Течение процесса и окончание намагничивания магнита или изделия может быть проконтролировано с помощью индикатора, такого как вольтметр 14. Достоинствами такого устройства являются небольшие габариты и небольшие значения тока, но такая установка не пригодна для намагничивания высококоэрцитивных магнитов.

Можно сделать вывод что схема установки с конденсаторным накопителем по сравнению со схемами с индуктивным накопителем при одинаковой энергии позволяет создать малогабаритную установку и по конструкции проще чем импульсные генераторы.

3.3. Выбор структурной схемы

Наибольший интерес с точки зрения универсальности и практической реализации, представляют схемы, показанные на рисунке 3.1 и 3.12

Обратимся к рисунку 3.1, на котором представлена структурная схема намагничивающей установки. Эта схема является бестрансформаторной. Рассмотрим импульсную установку с трансформатором, представленную на рисунке 3.12. В такой установке энергия от конденсаторов поступает в индуктор не сразу, а через промежуточный специальный импульсный трансформатор (ИТ).

Наличие ИТ в установке предоставляет ряд очень важных преимуществ:

- 1) Пониженное напряжение на индукторе.
- 2) Возможность получения сложных видов намагничивания.
- 3) Универсальность оборудования.

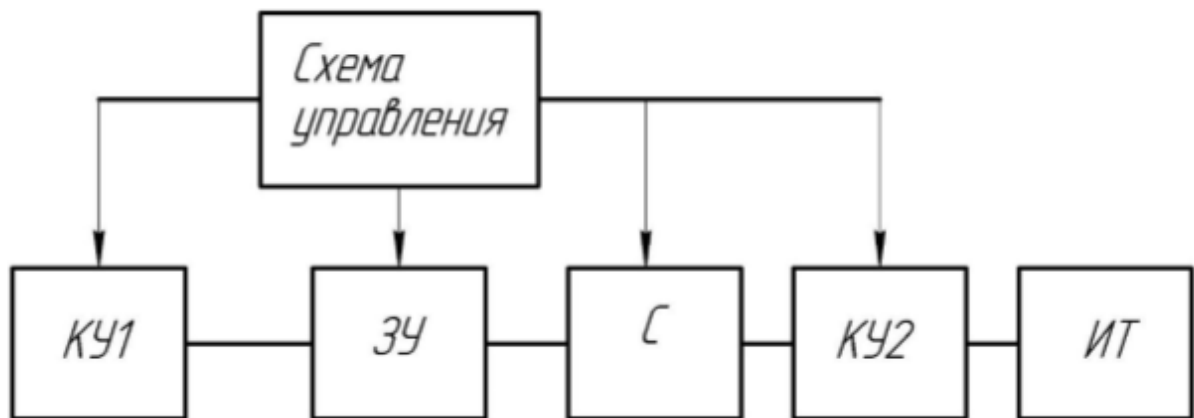


Рисунок 3.12 Структурная схема намагничивающей установки и импульсным трансформатором

Однако бестрансформаторная установка из-за ИТ представляется более громоздкой и имеет повышенное значение обратного импульса. Для устранения этого импульса нужно разрабатывать схемы для его уменьшения.

При реализации намагничивающей установки остановимся на схеме, приведенной на рис. 3.1. Современный уровень техники позволил использовать малогабаритные конденсаторы с большой емкостью для создания

конденсаторных батарей, которые в установках такого рода определяют основные габариты.

На рисунке 3.13 представлена структурная схема предлагаемой установки. Такая установка состоит из блока питания, который питается от сети переменного тока напряжением 220 В, накопителя энергии, в нашем случае – конденсаторная батарея. При включении устройства происходит накопление энергии в конденсаторе до определенной величины, затем открывается ключ, и напряжение заряда батареи конденсатора прикладывается к намагничивающей обмотке.



Рисунок 3.13 Структурная схема намагничивающей установки

3.4. Электрическая схема установки.

Схема управления в намагничивающей установке выполняет ряд задач. Первая задача — это произвести накопление энергии, вторая – производство однополярного импульса. Эти задачи выполняет коммутирующее реле Р1. Если обмотка реле Р1 находится под током, то осуществляется заряд конденсаторной батареи С3 и поджигающей емкости С2. При снятии напряжения с обмотки реле Р1 конденсаторная батарея отключается от зарядной цепи и разряжается через тиристор (см рис. 3.14), который поджигается через перекидной контакт реле Р1 от емкости С2. Кроме реле Р1 в схеме предусмотрена максимальное реле Р2, которое выполняет вспомогательные задачи, ускоряя заряд конденсаторной батареи при достижении 150 В. Кроме того, при шунтировании ограничительного сопротивления происходит подъем напряжения на конденсаторной батарее, позволяя увеличить амплитуду намагничивающего импульса. Для измерения напряжения на конденсаторной батарее подключается вольтметр V, который в режиме размагничивания фиксирует величину напряжения, с помощью которого производится частичное размагничивание.

Для устранения остаточного напряжения на конденсаторной батарее предусмотрено сопротивление R_8 , которого включается на конденсаторную батарею тумблером SB_2 . Величина этого сопротивления 10 кОм, мощность рассеивания его равна 2 Вт.

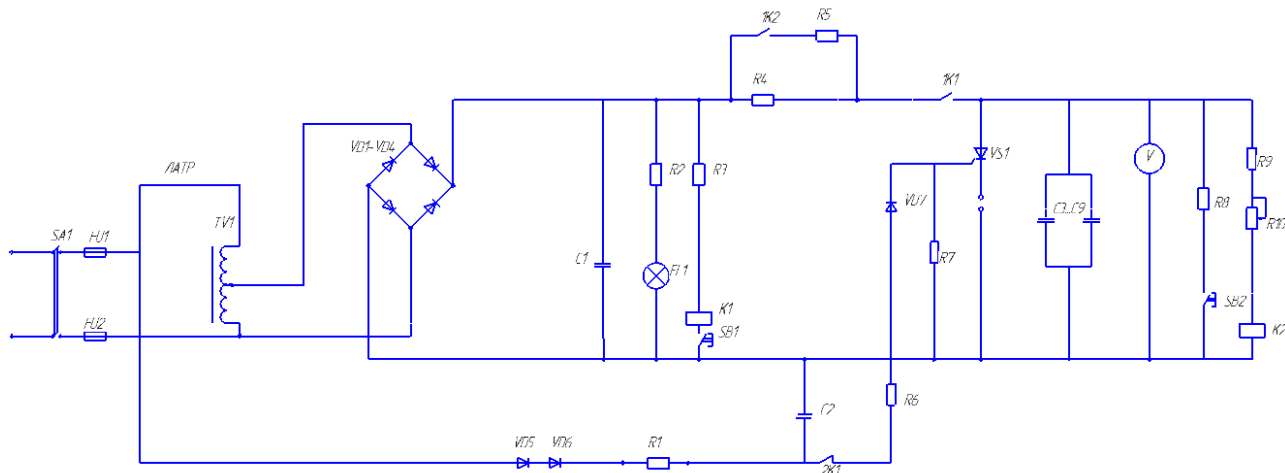


Рисунок 3.14 Принципиальная схема намагничивающей установки с тиристором

Питание установки осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В. Нам требуется предусмотреть в установке плавную регулировку величины размагничивающего тока. Для этого в схеме установки предусмотрен ЛАТР, который позволяет устанавливать любое напряжение на конденсаторной батарее. Принципиальная схема питания установки представлена на рисунке 3.15. Из него видно, что цепи заряда и открытия тиристора разделены. Это сделано по той причине, что в режиме размагничивания может понадобится такое напряжение, которое будет недостаточно для открытия тиристора.

На рисунке 3.15 обозначено:

- Сб – конденсаторная батарея;
- Сп – конденсатор для открытия тиристора;
- R_1, R_2 – ограничивающие сопротивления;
- $D_1 \div D_5$ – выпрямители.

Величина ограничивающего сопротивления выбирается из условия, что время заряда $T \leq 10$ с.

$$T = (3 \div 4) \tau_3 = (3 \div 4) R_1 C_\delta$$

В качестве сопротивления R_1 и R_2 выбраны два сопротивления 100 Ом и 96 Ом, включенные последовательно.

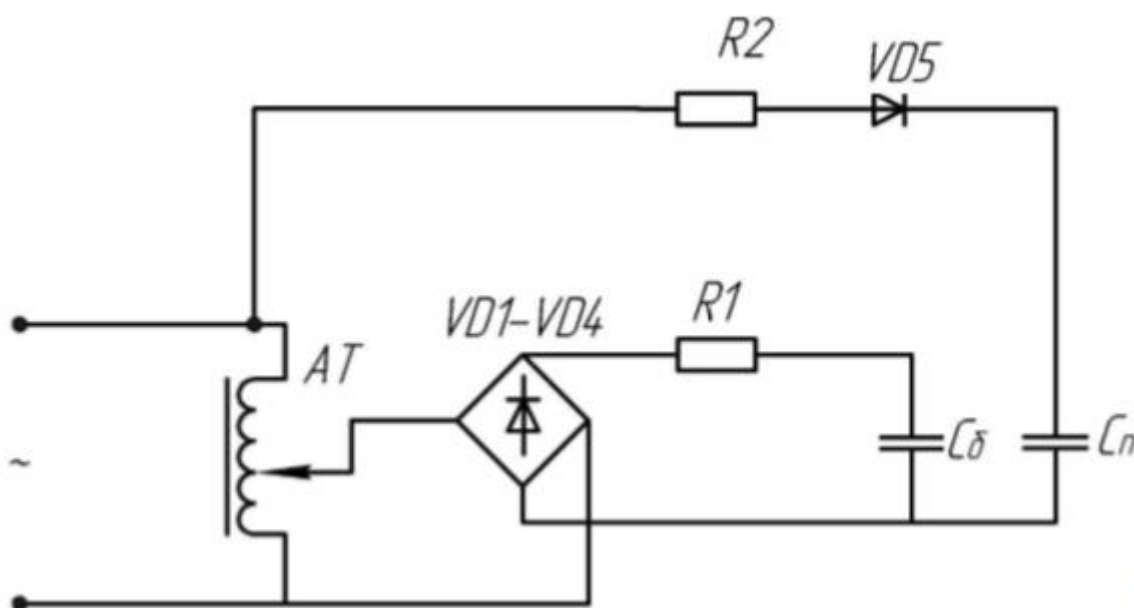


Рисунок 3.15 Принципиальная схема питания установки

Мощность рассеяния этих сопротивлений определяется из условия протекания среднего тока заряда. Тогда мощность рассеяния на первом сопротивлении равна 25 Вт, на втором – 15 Вт.

Выпрямляющий мост собран на четырех диодах типа КД-226Г, имеющих следующие данные: средний выпрямительный ток 1,7А, максимальная амплитуда обратного напряжения 600В.

3.5 Расчет узлов (элементов) намагничивающей установки

Простейшая магнитная цепь — это сердечник кольцевой катушки.

Применяются магнитные цепи неразветвленные и разветвленные, отдельные участки которых выполняются из одного или из разных материалов. Расчет магнитной цепи сводится к определению МДС по заданному магнитному потоку, размерам цепи и ее материалам. Для расчета цепь делят на участки l_1 , l_2 и т. д. с одинаковым сечением по всей длине участка, т. е. с однородным полем, определяют магнитную индукцию:

$$B = \frac{\Phi}{S}, \quad (3.16)$$

Электромагнит представляет собой катушку индуктивности, размещенную на магнитопроводе, и подключенную к источнику напряжения. Магнитопровод по своей конструкции может быть разветвленным и неразветвленным.

Основные параметры магнитной цепи:

1. МДС – магнитодвижущая сила (основной параметр источника магнитной энергии):

$$F = I w, \quad (3.17)$$

где I - ток в обмотке (А), w - число витков обмотки электромагнита.

2. Напряженность магнитного поля на любом участке магнитной цепи:

$$H = F/l_{cp} = w I/l_{cp}, \quad (3.18)$$

l_{cp} –длина средней линии магнитопровода (м). l_{cp} проводится на чертеже строго по середине сечения магнитопровода.

3. магнитная индукция:

$$B = \mu \mu_0 H, \quad (3.19)$$

где μ - магнитная проницаемость вещества, из которого изготовлен магнитопровод.

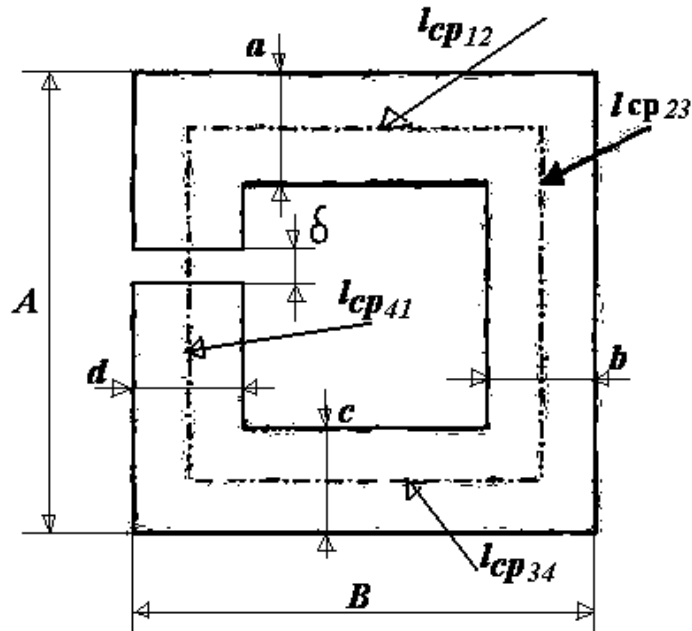
μ_0 - магнитная постоянная, $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$ Гн /м

4. Магнитный поток:

$$\Phi = B \cdot S, \quad (3.20)$$

где S - площадь поперечного сечения магнитопровода.

Теперь определим длину средней линии на каждом участке магнитопровода. И учтем воздушный зазор δ .



$$l_{cp12} = B - \frac{b}{2} - \frac{d}{2} = 165 - \frac{90}{2} - \frac{70}{2} = 85 \text{ мм} = 0,085 \text{ м}$$

$$l_{cp23} = A - \frac{a}{2} - \frac{c}{2} = 284 - \frac{50}{2} - \frac{64}{2} = 227 \text{ мм} = 0,227 \text{ м}$$

$$l_{cp34} = B - \frac{b}{2} - \frac{d}{2} = 165 - \frac{90}{2} - \frac{70}{2} = 85 \text{ мм} = 0,085 \text{ м}$$

$$l_{cp41} = A - \frac{a}{2} - \frac{c}{2} - \delta = 284 - \frac{50}{2} - \frac{64}{2} - 8 = 219 \text{ мм} = 0,219 \text{ м}$$

Теперь определим сечение магнитопровода на каждом участке зная что толщина магнитопровода $h=100$ мм:

$$S_{12} = 2 \cdot a \cdot 100 = 50 \cdot 100 = 10000 \text{ мм}^2 = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$S_{23} = 2 \cdot b \cdot 100 = 90 \cdot 100 = 18000 \text{ мм}^2 = 18 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$S_{34} = 2 \cdot c \cdot 100 = 64 \cdot 100 = 12800 \text{ мм}^2 = 12,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$S_{41} = d \cdot 100 = 70 \cdot 100 = 7000 \text{ мм}^2 = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Определяем основной магнитный поток магнитной цепи по формуле (3.20)
 $\Phi = B_{\delta} \cdot S_{\delta} = 2 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$

Определяем магнитную индукцию на каждом участке цепи при условии, что основной магнитный поток не изменяется.

$$B_{12} = \Phi / S_{12} = 7 \cdot 10^{-3} / 10 \cdot 10^{-3} = 0,7 \text{ Тл}$$

$$B_{23} = \Phi / S_{23} = 7 \cdot 10^{-3} / 18 \cdot 10^{-3} = 0,38 \text{ Тл}$$

$$B_{34} = \Phi / S_{34} = 7 \cdot 10^{-3} / 12,8 \cdot 10^{-3} = 0,54 \text{ Тл}$$

$$B_{41} = \Phi / S_{41} = 7 \cdot 10^{-3} / 7 \cdot 10^{-3} = 1 \text{ Тл}$$

Напряженность магнитной цепи для листовой стали Э11 определим по таблице (1.1):

B, Вб/м ²	H, А/м									
	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	140	143	146	149	152	155	158	161	164	167
0,5	171	175	179	183	187	191	195	199	203	207
0,6	211	216	221	226	231	236	241	246	251	256
0,7	261	266	271	276	281	287	293	299	306	312
0,8	318	324	330	337	344	352	360	369	378	387
0,9	397	407	417	427	437	447	458	469	480	491
1,0	502	514	527	541	555	570	585	600	615	631
1,1	647	664	682	701	720	739	759	779	800	821
1,2	843	866	891	918	946	976	1010	1040	1070	1100
1,3	1140	1180	1220	1260	1300	1340	1380	1430	1480	1530
1,4	1580	1640	1710	1780	1860	1950	2050	2150	2260	2380
1,5	2500	2640	2790	2950	3110	3280	3460	3660	3880	4120
1,6	4370	4630	4910	5220	5530	5880	6230	6600	6980	7370
1,7	7780	8200	8630	9070	9630	10100	10600	11100	11600	12200
1,8	12800	13400	14000	14600	15200	15900	16600	17300	18000	18800
1,9	19700	20600	21600	22 600	23600	24600	25600	26800	28200	29600
2,0	31000	32500	34300	36500	39000	42000	45500	49500	54500	59500

Таблица 1.1 Данные основной кривой намагничивания листовой электротехнической стали Э11

$$H_{12} = 261 \text{ А/м для } B_{12} = 0,28 \text{ Тл}$$

$$H_{23} = 140 \text{ А/м для } B_{23} = 0,155 \text{ Тл}$$

$$H_{34} = 187 \text{ А/м для } B_{34} = 0,218 \text{ Тл}$$

$$H_{41} = 502 \text{ А/м для } B_{41} = 0,4 \text{ Тл}$$

$$H_{\delta} = \frac{B_{41}}{\mu_0} = \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 80 \cdot 10^5 \text{ А/м}$$

По закону полного тока находим МДС на каждом участке МДС обмотки:

$$F_{12} = H_{12} \cdot l_{12} = 261 \cdot 0,085 = 22 \text{ А}$$

$$F_{23} = H_{23} \cdot l_{23} = 140 \cdot 0,227 = 32 \text{ А}$$

$$F_{34} = H_{34} \cdot l_{34} = 187 \cdot 0,085 = 16 \text{ A}$$

$$F_{41} = H_{41} \cdot l_{41} = 502 \cdot 0,219 = 110 \text{ A}$$

$$F_{\delta} = H_{\delta} \cdot \delta = 80 \cdot 10^5 \cdot 0,008 = 6400 \text{ A}$$

Зададимся амплитудой тока $I = 100 \text{ A}$

полная МДС равна:

$$F = F_{12} + F_{23} + F_{34} + F_{41} + F_{\delta} \quad (3.21)$$

По формуле (3.21) вычисляем:

$$F = 22+32+16+110+6400 = 6580 \text{ A}$$

Теперь определим условия оптимального режима работы подобных устройств. Рассмотрим вопрос выбора параметров намагничивающей катушки, то есть нагрузки импульсной намагничивающей установки, с целью получения наибольшей намагничивающей силы.

В основном при работе намагничивающей установки разряд имеет колебательный характер. Однако ключ для управления энергией накопителя пропускает только первую полуволну тока. Расчет такой цепи можно вести, предполагая отсутствия ключа, а потом рассматривая влияние ключа на отдельных участках интересующей зависимости [18].

Для цепи разряда конденсатора справедливо уравнение:

$$r i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = U_0, \quad (3.22)$$

где $r = r_y + r_n$; $L = L_y + L_n$.

Для периодического режима корни характеристического уравнения выражения (3.22) комплексные, и решение уравнения имеет вид:

$$i = i_m e^{-bt} \sin(\omega_0 t + \pi), \quad (3.23)$$

Где

$$I_m = \frac{U_0}{\omega_0 L},$$

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC + \frac{r^2}{4L^2}}}$ - круговая частота собственных колебаний;

$b = \frac{r}{2L}$ - коэффициент затухания.

Первый максимум тока определяется как

$$I_{max} = I_m e^{-\frac{b}{w_0}\theta} \sin\theta, \quad (3.24)$$

Где $\theta = \arctg \frac{w_0}{b} = \arcsin w_0 \overline{LC}$.

Этому соответствует максимальное значение намагничивающей силы

$$F_{max} = I_m W e^{-\frac{b}{w_0}\theta} \sin\theta, \quad (3.25)$$

где W - число витков намагничивающей катушки. Преобразуем (3.25) следующим образом:

$$F_{max} = \frac{U_0 W}{\frac{L_y + L_H}{c} + \frac{L_H}{c}} e^{-\frac{\frac{r_y + r_H}{2}}{\frac{L_y + L_H}{c} + \frac{L_H}{c}} \frac{r_y + r_H}{4} \theta}, \quad (3.26)$$

Сопротивление r_H можно представить как сумму двух сопротивлений:

$$r_H = r_{II} + r_3, \quad (3.27)$$

где r_{II} – активное сопротивление провода намагничивающей катушки; r_3 – эквивалентное активное сопротивление магнитной системы, которое определяет потери сердечника на намагничивание и вихревые токи. Для решения задачи в первом приближении и ввиду трудности определения потери считаем, что $r_H = r_{II}$, таким образом, пренебрегаем сопротивлением r_3 [18].

Задавшись площадью q окна намагничивающей катушки и считая, что ее обмотка полностью заполняет это окно, представим связь между числом витков W обмотки и диаметром d провода следующим образом:

$$q = \frac{S_n}{\square} W = \frac{\pi d^2}{4\square} W, \quad (3.28)$$

где S_n – площадь поперечного сечения провода; ζ – коэффициент заполнения, $\zeta \leq 0,5$

Где

$$W = K \frac{l}{d^2}; K = \frac{4q\square}{\pi}, \quad (3.29)$$

Активное сопротивление r_{II} можно определить как:

$$r_n = r_n = \rho l / S_n, \quad (3.30)$$

где ρ – удельное сопротивление материала провода намагничивающей катушки;
 l – длина провода.

Длину провода представим как

$$l = K_1 \cdot w, \quad (3.31)$$

где K_1 – средняя длина витка обмотки.

Подставляя (3.29) и (3.32) в (3.31), получим

$$r_n = K_\zeta w^2, \quad (3.32)$$

Индуктивность L пропорциональна квадрату числа витков, т.е.

$$L = K_L w^2, \quad K_L = \frac{\mu_0 S_{4l}}{\delta} \quad (3.33)$$

где K_L – коэффициент пропорциональности, который зависит от материала и размеров намагничиваемого магнита.

Известно, что амплитуда первого импульса определяется выражением:

$$I_m = U_0 \frac{C}{L}, \quad (3.34)$$

Из выражения (3.34) имеем:

$$C = L \frac{I_m^2}{U_0^2}, \quad (3.35)$$

Зададимся величиной начального напряжения $U_0=250$ В

Найдем энергию магнитного поля W_m :

$$W_m = B \cdot H \cdot V \quad (3.36)$$

Где B – магнитная индукция

H – напряженность магнитного поля в зазоре

V – объем воздушного зазора

Рассчитаем объем зазора по формуле:

$$V = \delta \cdot d \cdot h, \quad (3.37)$$

Рассчитаем напряженность магнитной цепи:

$$H = \frac{B}{\mu_0}, \quad (3.38)$$

После подставления в формулу (3.36) получаем:

$$W_M = \frac{B^2 \delta dh}{\mu_0}, \quad (3.39)$$

$$W_M = \frac{4 \cdot 0,008 \cdot 0,07 \cdot 0,1}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 180 \text{ Дж}$$

Энергию накопителя возьмем на 20% больше, для того что бы учесть потери

$$W_c = 1.2 W_M \quad (3.40)$$

Теперь выведем формулу емкости конденсатора через энергию накопителя:

$$W_c = \frac{C \cdot U_0^2}{2}, \quad (3.41)$$

Отсюда следует что:

$$C = \frac{2 \cdot W_c}{U_0^2}, \quad (3.42)$$

$$C = \frac{2 \cdot 1.2 \cdot 180}{250^2} = 0.007 \text{ Ф} = 7000 \text{ мкФ}$$

Для получения такой емкости при заданном напряжении используются конденсаторы ELZET. Их паспортные данные: емкость 1000мкФ рабочее напряжение 400В. Для получения рассчитанной емкости конденсаторной батареи собирается блок из семи конденсаторов.

Задавшись нужным временем разряда $\tau = 0,5 \text{ с}$, найдем индуктивность катушки и количество витков катушки:

$$\tau = \pi \sqrt{L \cdot C} = 0,5 \text{ с}, \quad (3.43)$$

Отсюда

$$L = \frac{\tau^2}{\pi^2 C}, \quad (3.44)$$

$$L = \frac{0,5^2}{0.007 \cdot 3.14^2} = 3.6 \text{ Гн}$$

Из формулы (3.33) найдем количество витков катушки:

$$w = \frac{L}{K_L}, \quad (3.45)$$

Подставив данные в формулу, получим:

$$w = \frac{\overline{L \cdot \delta}}{\mu_0 S_{41}}, \quad (3.46)$$

$$w = \frac{3.6 \cdot 0.008}{4 \cdot 3.14 \cdot 10^{-7} \cdot 7 \cdot 10^{-3}} = 1810 \text{ витков}$$

Теперь определим амплитуду первого импульса тока подставив значения в формулу (3.34):

$$I_m = 250 \cdot \frac{\overline{0.007}}{3.6} = 11 \text{ А}$$

Теперь определим диаметр провода обмотки катушки:

$$d = \frac{\overline{q \cdot 4 \square}}{\pi \cdot w}, \quad (3.47)$$

$$d = \frac{6.8 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 0.5}{3.14 \cdot 1810} = 0.0015 \text{ м} = 1,5 \text{ мм}$$

В данной схеме будем использовать тиристор типа 2Т112-10-5, который обладает низкими динамическими потерями, малым зарядом обратного восстановления и разветвленным управляющим электродом для высоких скоростей нарастания тока. Ниже приведем его характеристики.

Средний прямой ток – 10А;

Повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии-100÷1600 В;

Повторяющееся импульсное обратное напряжение - 100÷1600 В;

Максимальный прямой ток управления – 15А;

Максимальное обратное напряжение управления – 2,5 В;

Пороговое напряжение, макс – 1.2 В;

Время задержки включения – 2.5 мкс;

Время выключения – 20÷50 мкс.

Заключение

Во время выполнения выпускной квалификационной работы были рассмотрены магнитные характеристики магнитных материалов. Была проведена классификация магнитотвердых материалов.

В ходе работы был проведен обзор намагничивающих устройств и была выбрана для разработки импульсная установка для намагничивания. Был произведен обзор существующих импульсных установок. При разработке установки были рассмотрены основные параметры намагничивающих полей, определены условия оптимального режима работы установки. В качестве импульсного источника тока была выбрана конденсаторная батарея. Была разработана структурная схема намагничивающей установки, затем на ее основе спроектирована электрическая принципиальная схема. Был произведен необходимый расчет элементов и параметров установки.

Список используемых источников

1. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник для студ. учреждений высш. образования / [В.В. Алексеев, Б.Я. Авдеев, Е.М. Антонюк и др.]; под ред. В.В. Алексеева. – М.: Издательский центр «Академия», 2014, 368 с. – (Сер. Бакалавриат).
2. Физические основы магнитных материалов: учебное пособие по направлениям "Электроника и наноэлектроника" и "Нанотехнологии и микросистемная техника" / К. Г. Гареев, В. П. Мирошкин ; общ. ред. В. П. Мирошкин ; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" . – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014. – 408 с.
3. Преображенский А.А., Бишард Е.Г. Магнитные материалы и элементы: Учебник для студ. вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики». – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 352 с.: ил.
4. Мегаэнциклопедия Кирилла и Мефодия [электронный ресурс]: Магнитотвердые материалы, URL:
<http://megabook.ru/article/Магнитотвердые%20материалы>
5. Пат. 2392681 Российская Федерация, МПК H01F 13/00 (2006.01). Способ косоугового намагничивания ферромагнитного тороида [Текст] / О.Ф. Меньших. - № 2008151338/09; заявл. 23.12.2008; опубл. 10.06.2010, Бюл. № 16.
6. Киффер И.И. Испытания ферромагнитных материалов, М., «Энергия», 1969. 360 с. с илл.
7. Пат. 2533661 Российская Федерация, МПК H01F 13/00 (2006.01). Намагничивающая установка (варианты) [Текст] / И.Х. Хайруллин, Ф.Р. Исмагилов, Р.Д. Каримов и др. – № 2013101279/07; заявл. 10.01.2013; опубл. 20.11.2014, Бюл. № 32.
8. Пат. 2509385 Российская Федерация, МПК H01F 13/00 (2006.01). Способ создания тороидального магнитного поля [Текст] / О.Ф. Меньших. - № 2012139942/07; заявл. 18.09.2012; опубл. 10.03.2014, Бюл. №7.

9. Пат. 2502146 Российская Федерация, МПК H01F 13/00 (2006.01). Способ намагничивания ферромагнитных параллелепипедов [Текст] / О.Ф. Меньших. - № 2012125284/07; заявл. 18.06.2012; опубл. 20.12.2013, Бюл № 35.
10. Определение параметров импульсных полей, необходимых для намагничивания изделий [Текст] / Ж.Г. Абрамян // Известия вузов. Приборостроение. – 1972. – Том15, N 3. – С. 112-115.
11. Малогабаритная установка для импульсного намагничивания постоянных магнитов [Текст] / А.А. Преображенский, Р.Д. Работнов // Известия вузов. Приборостроение. – 1964. – N. 12. – С. 113-116.
12. Авторское свидетельство СССР №1684817 A1, кл. H 01 F 13/00. Устройство для импульсного намагничивания постоянных магнитов [Текст] / Д.Л. Карелов, Г.В. Берозашвили. 4729928/07; заявлено 18.08.89; опубл. 15.10.91, Бюл. №38.
13. Авторское свидетельство СССР №1760566 A1, кл. H 01 F 13/00. Устройство для намагничивания высококоэрцитивных магнитов электромагнитного привода с магнитопроводом и обмоткой возбуждения [Текст] / В.С. Скляр, В.П. Себко, Б.М. Горкунов, А.А Авраменко, В.В. Лысенко. 4904410/07; заявлено 22.01.91; опубл. 07.09.92, Бюл. №33.
14. Авторское свидетельство СССР №698061, кл. H 01 F 13/00. Импульсное намагничивающее устройство [Текст] /А.Н. Остапенко, В.М. Кузьмин, Э.Н. Подборский. 2632458/24-07; заявлено 12.06.78; опубл. 15.11.79, Бюл. №42.
15. Авторское свидетельство СССР №1522302 A1, кл. H 01 F 13/00. Устройство для намагничивания и размагничивания постоянных магнитов [Текст] / А.Я. Пригодин, В.С. Кишкис. 4295927/24-07; заявлено 10.08.89.; опубл. 15.11.89, Бюл. №42.
16. Авторское свидетельство СССР №1410114 A1, кл. H 01 F 13/00. Намагничивающее устройство [Текст] / А.А.Никитин.4167501/24-07; заявлено 25.12.86.; опубл. 15.07.88, Бюл. №26.
17. Пат. 2451351 Российская Федерация, МПК H01F 13/00 (2006.01). Способ намагничивания ферромагнитного тороида [Текст] / О.Ф. Меньших. - № 2010129016/07; заявл. 13.07.2010; опубл. 20.05.2012, Бюл. № 14.

18. К вопросу об оптимальных условиях работы импульсного намагничивающего устройства [Текст] / А.А. Преображенский, Ж.Г. Абрамян // Электронная техника. Ферритовая техника. – 1970. – Вып. 2. – С. 85-90.
- 19 Пат. 2409876 Российская Федерация, МПК H01F 13/00 (2006.01). Способ намагничивания магнито жесткого ферромагнетика [Текст] / О.Ф. Меньших. - № 2010106585/07; заявл. 24.02.2010; опубл. 20.01.2011, Бюл. № 2.
20. Опытный метод определения параметров импульсного намагничивающего устройства [Текст] / А.А. Преображенский, Ж.Г. Абрамян // Электронная техника. Ферритовая техника. – 1970. – Вып. 2. – С. 91-94.
21. Стабильность постоянных магнитов [Текст] / А.А. Преображенский, Л.А. Кавалерова // Энциклопедия измерений, контроля и автоматизации. – 1970. – Вып. 14. – С. 5-8.
22. Пат. 2419906 Российская Федерация, МПК H01F 13/00 (2006.01). Устройство и способ размагничивания длинномерных ферромагнитных изделий [Текст] / А.Г. Цыпуштанов, К.Е. Елисеев, А.А. Червонцев. - № 2010110385/07; заявл. 18.03.2010; опубл. 27.05.2011, Бюл. № 15.
23. Пат. 2528608 Российская Федерация, МПК H01F 13/00 (2006.01), A61N 2/02. Способ размагничивания объема намагниченного тела [Текст] / И.А. Ефремов, И.О. Александров. - № 2012156719/07; заявл. 25.12.2012; опубл. 20.09.2014, Бюл. № 26.
24. Пат. 2486618 Российская Федерация, МПК H01F 13/00 (2006.01). Способ размагничивания изделий из ферромагнитных материалов и устройство для его осуществления [Текст] / А.М. Кашин, С.В. Башилов. - № 2011145750/07; заявл. 11.11.2011; опубл. 27.06.2013, Бюл. № 18.
25. Расчет и оптимизация многосекционного индуктора для импульсного размагничивания (намагничивания) высококоэрцитивных магнитов [Текст] / А.М. Самылкин, А.Ю. Кивокурцев, М.Н. Аршинов // Электронная техника. СВЧ – Техника. – 2014. – Вып. 4(523). – С. 80-87.
26. Янке Е. Специальные функции. Формулы, графики, таблицы / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Леш; пер. с нем. под ред. Седова Л.И. – М.: Наука, 1977.

27. Шимони К. Теоретическая электротехника / Карой Шимони. – М.: Мир, 1964. – 773 с.
28. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / Пер. с англ. Г. Кнопфель. – М.: Мир, 1972.
29. Приближенный расчет трансформатора для магнитной стабилизации постоянных магнитов [Текст] / А.А.Преображенский, Ж.Г. Абрамян // Информационно-измерительная техника под. ред. А.В Фремке.: Изд-во «ЛЭТИ», 1973.