

**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)**

Направление	12.04.01 -Приборостроение
Программа	Локальные измерительно-вычислительные системы
Факультет	ИБС
Кафедра	ИИСТ

К защите допустить

Зав. кафедрой

Алексеев В.В.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
МАГИСТРА**

**Тема: ИМПУЛЬСНОЕ НАМАГНИЧИВАНИЕ ПОСТОЯННЫХ
МАГНИТОВ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ**

Студент			Корнев О.О.
		<i>подпись</i>	
Руководитель	<i>к.т.н, доцент (Уч. степень, уч. звание)</i>		Бишард Е.Г.
		<i>подпись</i>	
Консультанты	<i>к.т.н, доцент (Уч. степень, уч. звание)</i>		Буканин В.А.
		<i>подпись</i>	
	<i>к.т.н, ассистент (Уч. степень, уч. звание)</i>		Романцова И.И.
		<i>подпись</i>	

Санкт-Петербург

2017

ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

Утверждаю
Зав. кафедрой ИИСТ
_____ Алексеев В.В.
«___» _____ 20__ г.

Студент Корнев О.О.

Группа 1586

Тема работы: Импульсное намагничивание постоянных магнитов для стабилизации характеристик измерительных приборов

Место выполнения ВКР: СПбГЭТУ «ЛЭТИ» Кафедра ИИСТ

Исходные данные (технические требования):

1. Максимальное напряжение заряда 290 В
2. Остаточное напряжение после разряда
при $R_{вн} = 0 - 40 \text{ В}$;
при $R_{вн} = 0.01 \text{ Ом} - 30 \text{ В}$.
3. Амплитуда импульса тока
при $R_{вн} = 0 - 27 \text{ кА}$;
при $R_{вн} = 0.01 \text{ Ом} - 24 \text{ кА}$

Содержание ВКР:

1. Краткий обзор современных магнитотвердых материалов и их магнитных характеристик.
2. Технические устройства для намагничивания.
3. Основы проектирования импульсных установок.
4. Разработка малогабаритной импульсной намагничивающей установки конденсаторного типа.
5. Разработка размагничивающего устройства для намагничивающей уста-

новки конденсаторного типа

Перечень отчетных материалов: пояснительная записка, иллюстративный материал

Дополнительные разделы: Специальные вопросы обеспечения безопасности.

Дата выдачи задания

«___»_____20___ г.

Дата представления ВКР к защите

«___»_____20___ г.

Студент

Корнев О.О

Руководитель

к.т.н, доцент
(Уч. степень, уч. звание)

Бишард Е.Г.

Консультант

к.т.н, доцент
(Уч. степень, уч. звание)

Буканин В.А.

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН ВЫПОЛНЕНИЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Утверждаю

Зав. кафедрой ИИСТ

_____Алексеев В.В

« » _____ 20 ____ г.

Студент Корнев О.О

Группа 1586

Тема работы: Импульсное намагничивание постоянных магнитов для стабилизации характеристик измерительных приборов

№ п/п	Наименование работ	Срок выполнения
1	Обзор литературы по теме работы	15.01 – 29.03
2	Краткий обзор современных магнитотвердых материалов и их магнитных характеристик	30.03 – 05.04
3	Технические устройства для намагничивания	06.04 – 12.04
4	Основы проектирования импульсных установок	13.04 – 19.04
5	Разработка малогабаритной импульсной намагничивающей установки конденсаторного типа	20.04 – 24.04
6	Разработка размагничивающего устройства для намагничивающей установки конденсаторного типа	25.04 – 27.04
7	Специальные вопросы обеспечения безопасности	28.04 – 01.05
8	Оформление пояснительной записки	02.05 – 05.05
9	Оформление иллюстративного материала	06.05 – 15.05

Студент

Корнев О.О

Руководитель *к.т.н, доцент*
(Уч. степень, уч. звание)

Бишард Е.Г.

Консультант *к.т.н, доцент*
(Уч. степень, уч. звание)

Буканин В.А.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка 128 стр., 51 рис., 4 табл., 33 ист.

НАМАГНИЧИВАНИЕ, РАЗМАГНИЧИВАНИЕ, ИНДУКТОР, ЕМКОСТНОЙ НАКОПИТЕЛЬ, МАГНИТОТВЕРДЫЙ МАТЕРИАЛ ПОСТОЯННЫЙ МАГНИТ, СОЛЕНОИД, ЭЛЕКТРОМАГНИТ, ПЕРМЕАМЕТР, ИМПУЛЬСНЫЕ ПОЛЯ

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

Цель работы –провести теоретические исследования по выбору параметров намагничивающих полей для намагничивания постоянных магнитов. Разработать импульсную малогабаритную установку для намагничивания и стабилизации свойств постоянных магнитов.

В выпускной квалификационной работе рассмотрены магнитные характеристики современных магнитотвердых материалов. Дана классификация магнитотвердых материалов. Определены значения, требующихся полей в диапазоне $150 \div 4000$ кА/м, для намагничивания. В качестве устройства намагничивания выбрана импульсная установка. Произведен патентный поиск технических решений проектирования импульсных установок. Проанализированы причины возникновения нестабильности свойств постоянных магнитов. Предложено частичное размагничивание, как один из методов стабилизации магнитного состояния системы с постоянными магнитами. Произведен расчет индуктора для частичного размагничивания, а также приближенный расчет трансформатора для магнитной стабилизации. Рассмотрены вопросы обеспечения безопасности.

ABSTRACT

In this work, the development and calculation of a pulsed magnetizing and demagnetizing installation has been carried out. The necessary calculation of the elements and parameters of the installation was made. The amplitude of a single pulse was determined experimentally. A circuit for testing the capacitors was also developed.

The experimental characteristics of the plant are obtained. In the course of the work, the principles of magnetic instability were disassembled,

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	10
1	Краткий обзор современных магнитотвердых материалов и их магнитных характеристик	12
1.1.	Классификация магнитных материалов	12
1.2.	Магнитные характеристики современных магнитотвердых материалов	13
1.2.1	Кривая намагничивания	14
1.2.2	Петля гистерезиса	20
1.3	Краткая классификация современных магнитотвердых материалов и их свойств	23
2	Технические устройства для намагничивания магнитотвердых материалов	29
2.1	Общие соображения по намагничиванию постоянных магнитов из магнитотвердых материалов	29
2.2.	Классификация намагничивающих устройств	30
2.2.1	Намагничивающие установки на постоянном токе – электромагниты	30
2.2.2	Намагничивающие установки в виде соленоидов	37
2.2.3	Импульсные намагничивающие установки	41
3	Основы проектирования импульсных установок	44
3.1.	Выбор источника импульсного тока для намагничивающей установки	44
3.2.	Расчет оптимальных параметров импульсного поля, необходимого для намагничивания систем с постоянным магнитом	48
3.3.	Патентный поиск технических решений построения импульсных намагничивающих установок	53
4	Разработка малогабаритной импульсной намагничивающей установки конденсаторного типа	68

4.1	Выбор структурной схемы ее построения	68
4.2	Расчет узлов (элементов) намагничивающей установки	71
4.2.1	Выбор параметров намагничивающей обмотки	71
4.2.2	Расчет емкостного накопителя	75
4.2.3	Выбор ключа	77
4.2.4	Выбор схемы управления	81
4.2.5	Блок питания установки	83
4.3	Экспериментальные исследования	84
4.3.1	Измерение амплитуды одиночного импульса	84
4.3.2	Опытный метод определения параметров импульсной установки	87
5	Разработка размагничивающего устройства для намагничивающей установки конденсаторного типа	90
5.1	Причины возникновения неустойчивости свойств постоянных магнитов	90
5.2	Частичное размагничивание как один из методов стабилизации магнитного состояния системы с постоянными магнитами	101
5.3	Расчет импульсного индуктора для частичного размагничивания	105
5.4	Расчет трансформатора для магнитной стабилизации свойств постоянных магнитов	109
6	Специальные вопросы обеспечения безопасности	113
6.1.	Обоснование СВОБ	113
6.2.	Общая характеристика условий применения	113
6.3.	Характеристика специальных вопросов безопасности	114
6.4	Электробезопасность	118
6.4.1	Электробезопасность при проектировании	118
6.4.2	Электробезопасность при эксплуатации	119
6.5	Электромагнитная безопасность	120

6.6	Пожаробезопасность изделия	121
	Заключение	124
	Список использованных источников	125

ВВЕДЕНИЕ

Не существует практически ни одной отрасли промышленности, где бы не использовались 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 этим материалам усилился в последнее время в виду новых открытий в области физики магнитных материалов, благодаря которым появились постоянные магниты с большой коэрцитивной силой – редкоземельных. Однако потребность авиационно-космической техники, а также заказы оборонных предприятий требуют дальнейшего развития магнитотвердых материалов со специализированными магнитными свойствами, таких, например, как магнитные композиционные материалы на основе ультрадисперсионного политетрафторэтилена и кобальтсодержащих наночастиц, обладают коэрцитивной силой равной 71,6 кА/м [1]. Для сравнения постоянные магниты на редкоземельных элементах имеют коэрцитивную силу $H_c=55$ кА/м.

Естественно, что встает вопрос о том, каким образом надо намагничивать эти материалы, как контролировать степень их промагничивания, какую измерительную аппаратуру выбрать. Задача усложняется еще тем, что постоянные магниты различного применения имеют, как показал подробный обзор литературных источников и патентные исследования в России и за рубежом, разные размеры, объемы и конфигурации. Эти задачи решались и раньше путем сложных теоретических построений и экспериментальным путем. В выпускной работе была поставлена задача анализа вопросов, возникающих при намагничивании и размагничивании современных литых магнитотвердых материалов относительно простой формы – цилиндрических, скобообразных и т.д.

Для решения поставленной задачи требуется провести экспериментальные исследования в лабораторных условиях на специальной аппаратуре. В выпускной квалификационной работе рассматривается импульсная намаг-

ничивающая установка для промагничивания образцов, выполненных из литых постоянных магнитов марки ЮНДК, ReSmCo_5 . Поставлена задача определить параметры импульсного намагничивающего тока и на их основе спроектировать устройство намагничивания с обеспечивающими эти требования элементами. Поскольку в большинстве технических средств проблемы намагничивания тесно связаны с проблемами дальнейшего размагничивания, то в работе предлагается решить некоторые вопросы построения индукторов для размагничивания постоянных магнитов.

В приборостроительной промышленности при изготовлении измерительных приборов эти задачи носят практический характер и будут рассмотрены применительно для целей стабилизации их характеристик, удобства сборки и других.

1. КРАТКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МАГНИТОТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

1.1 Классификация магнитных материалов

Общепринятое определение магнитных материалов дано в ГОСТ 19693-74 «Материалы магнитные. Термины и определения», согласно которому это материалы, обладающие свойствами ферро- или ферримагнетика. В обычной практике «магнитный материал» означает наличие у него магнитных свойств, за счет которых он может быть использован для создания различных устройств [2].

По магнитным свойствам и особенностям их применения все магнитные материалы делятся на:[3]

1. Магнитомягкие
2. Магнитотвердые
3. Материалы специального назначения

К основным магнитным характеристикам магнитных традиционных материалов относятся кривые намагничивания, петли гистерезиса, различные виды магнитной проницаемости и магнитные потери.

Для магнитомягких материалов характерными свойствами являются малые потери на перемагничивание, малые значения коэрцитивной силы и большие значения магнитной проницаемости.

Магнитотвердые материалы (материалы для постоянных магнитов) обладают высоким значением коэрцитивной силы H_c и примерно такой же как у магнитомягких значением остаточной индукции B_r .

В группу магнитных материалов специального назначения выделяют материалы, обладающие каким-то специфическим свойством, позволяющим на его основе создавать специализированные устройства, например, магнитооптические, магнитострикционные, термомагнитные и прочие [3].

1.2 Магнитные характеристики современных магнитотвердых материалов

Наиболее компактно можно представить магнитные характеристики магнитотвердых материалов на рисунке 1.1, где приведено схематическое изображение кривых намагничивания по намагниченности I $\mu_0 I = f(H)$, участками петли гистерезиса для I и II квадранта по индукции B $B = f(H)$, максимальной магнитной энергией $W = f(B)$, и коэффициентом возврата $\mu_\Delta = f(B)$.

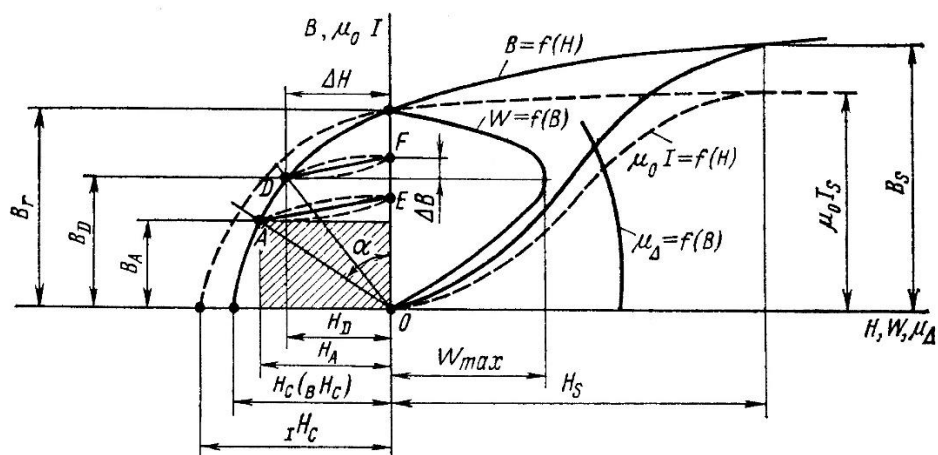


Рисунок 1.1 Схематическое изображение кривых намагничивания и размагничивания

Поскольку магнитотвердые материалы используются чаще всего в качестве постоянных магнитов – то есть активных источников, создающих внешние магнитные поля, то основными его параметрами являются:

а) Петля гистерезиса. После снятия внешнего поля магнитные свойства материала характеризуются кривой размагничивания – участком гистерезисной петли, расположенным во II квадранте. Положение рабочей точки А на этой кривой определяется конфигурацией магнитной цепи системы с постоянным магнитом. Индукцию B_A называют кажущейся остаточной индукцией.

б) 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.

в) Коэффициент выпуклости кривой размагничивания материала

$\gamma = \frac{(BH)_{max}}{B_r H_c}$, где B_r – остаточная индукция, H_c – коэрцитивная сила.

г) Коэффициент возврата $\mu_\Delta = \frac{\Delta B}{\mu_\Delta \Delta H}$ 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).

Ниже в 1.2.1 и 1.2.2 будут более подробно рассмотрены эти показатели, поскольку их понимание может пригодиться для описания процессов, происходящих при намагничивании и размагничивании материала.

1.2.1 Кривая намагничивания

Магнитные свойства ферромагнетиков обладают зависимостями магнитной индукции B или намагниченности I от напряженности поля H и потерь на перемагничивание P от индукции и частоты.

Зависимость вида

$$B = f(H), \quad (1.1)$$

где B – магнитная индукция материала (Тл), H – напряженность внешнего поля, именуют кривой намагничивания. Это ключевая характеристика магнитных материалов, она демонстрирует зависимость намагниченности или магнитной индукции материала от напряженности внешнего поля H . Установлено, что магнитные свойства материала находятся в зависимости не только от напряженности поля, температуры, присутствия или отсутствия механических напряжений и т. д., но и от предшествующего магнитного состояния.

В многочисленных вариантах с целью получения кривых намагничивания в качестве начального исходного состояния берут размагниченное состояние образца, при котором в отсутствии внешнего поля индукция равна нулю и нет преимущественного направления намагничивания доменов, то есть они находятся статистически равновероятно [2].

Ферромагнитные материалы состоят из областей, которые в том числе при отсутствии внешнего поля намагничены до насыщения (области самопроизвольного намагничивания). Если образец из ферромагнитного материала не испытывал действие магнитного поля, то области самопроизвольного намагничивания в нем размещены таким образом, что его результирующая намагниченность равна нулю, то есть он пребывает в размагниченном состоянии. Как правило намагниченность (индукция) не является конкретной функцией напряженности магнитного поля, а находится в зависимости от магнитной «предыстории» образца.

По этой причине необходимо условиться о исходном состоянии среды, для которой формируется зависимость индукции(намагниченности) от напряженности магнитного поля. Под исходным состоянием понимают состояние так называемого полного размагничивания, которое характеризуется одновременным равенством нулю намагниченности и напряженности магнитного поля ($J=0$ и $H=0$). Установив такой образец в магнитное поле, монотонно и медленно изменяющееся от нуля до некоторой величины можно определить его кривую намагничивания $J(H)$ (или кривую индукции $B(H)$), которая называется кривой первоначального намагничивания (индукции). Стандартный вид кривой намагничивания изображен на рисунке 1.2.

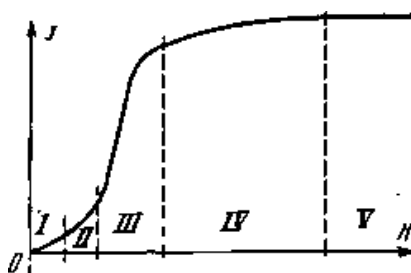


Рисунок 1.2. Кривая первоначального намагничивания

Для материалов, подвергшихся размагничиванию магнитным полем, говорить о кривой первоначального намагничивания можно только относительно, это связано с проблемой восстановления первоначального размагниченного состояния с таким же распределением участков самопроизвольного намагничивания. Если учесть, что в основном невозможно полностью размагнитить ферромагнитный образец так, чтобы в нем было действительно

хаотическое расположение векторов магнитных моментов областей самопроизвольного намагничивания (исключая случай его нагрева выше температуры Кюри, когда это возможно), что у ряда материалов свойства необратимо изменяются после первого намагничивания (например, перминвар), что группа материалов (с магнитной текстурой) вообще не может быть получен в размагниченном состоянии, а также что экспериментально получить кривую первоначального намагничивания, как правило, весьма трудно, то следует признать, что эта кривая не может являться технической характеристикой ферромагнитных материалов.

В общем случае кривую первоначального намагничивания можно разделить на пять участков (рис. 1.2)

I — область начального или обратимого намагничивания (проницаемость постоянна); II — область Рэлея, область, где величина нормальной остаточной намагниченности прямо пропорциональна квадрату напряженности приложенного магнитного поля; III — область наибольших проницаемостей; IV — область приближения к насыщению; V — область парапроцесса.

Наиболее эффективное размагничивание может быть получено нагреванием материала выше точки Кюри. Тем не менее в технике этот способ применяют мало из-за трудностей, появляющихся при его практическом осуществлении. Большого всего размагничивание осуществляется помещением образца в переменное поле с убывающей до нуля амплитудой, используя для этого специальные устройства или измерительную схему.

Максимальная напряженность размагничивающего поля, требующееся для получения почти полного размагничивания, отличается для разных групп материалов и должна в несколько раз быть больше величины коэрцитивной силы. Необходимо также, чтобы частота поля не была высокой, в обратном случае размагничиванию будет преграждать экранирующее действие вихревых токов. Наиболее правильное использовать поле с частотой 5—10 Гц и скоростью убывания не больше 1—2% при каждом цикле. В основном при-

меняют поле с частотой 50 Гц или непрерывно коммутируют и уменьшают постоянное поле.

При намагничивании предварительно размагниченного образца различают следующие виды зависимостей:

1) нулевая (начальная) кривая намагничивания, которая получается при монотонном увеличении H ;

2) безгистерезисная (идеальная) кривая намагничивания, получаемая при одновременном действии постоянного поля и переменного с убывающей до нуля амплитудой (рис. 1.3, кривая а);

3) основная (коммутационная) кривая намагничивания, представляющая собой геометрическое место вершин кривых симметричных петель гистерезиса, получающихся при циклическом перемагничивании (рис. 1.3, кривая б).

Нулевая кривая почти совпадает с основной.

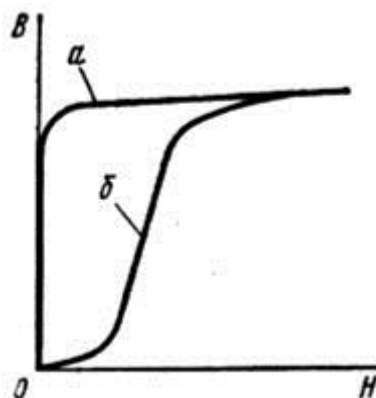


Рисунок 1.3. Кривые намагничивания предварительного образца.

Нулевая кривая намагничивания находится в зависимости от случайных причин, например, от механических вибраций, колебаний температуры, характера изменения намагничивающего поля и другое. Для этой кривой в значительной степени заметно проявляется эффект Баркгаузена — непостоянный, ступенчатый характер намагничивания. Поэтому получается, что нулевая кривая не соответствует требованию хорошей воспроизводимости и не может быть применена для сравнительной оценки свойств разных материалов. Между тем обнаружена возможность применения скачкообразных изме-

нений намагниченности в магнитоизмерительной технике и для исследования физико-химических свойств магнитных материалов.

Безгистерезисная кривая намагничивания характеризуется быстрым ростом индукции до значения насыщения даже в слабых постоянных полях независимо от видов магнитного материала. Намагничивание по этой кривой имеет место исключительно в некоторых случаях.

Основная кривая намагничивания является важнейшей характеристикой магнитных материалов, отвечает требованиям хорошей воспроизводимости и широко используется для характеристики намагничивания материалов в постоянных полях.

Все характеристики, рассмотренные выше, относятся к характеристикам магнитного вещества, и при их определении магнитная цепь образца должна быть замкнута. Примерами такой цепи могут быть кольцевые образцы, витые сердечники трансформаторов и дросселей и так далее. Тем не менее на практике в большинстве случаев магнитная цепь является разомкнутой, то есть содержит воздушный зазор, обладающий, как правило, значительным магнитным сопротивлением по сравнению с остальной частью цепи. Присутствие зазора способно значительно поменять ход кривых намагничивания, значения проницаемости, стабильности и другие свойства. При разомкнутой магнитной цепи важно учитывать собственное поле образца — так называемое размагничивающее поле H_p , которое направлено встречно внешнему намагничивающему полю H . Из рисунка 1.4 видно, что если магнитная цепь образца разомкнута, то при помещении его в поле напряженностью H индукция в материале определяется не точкой a , а точкой a' , соответствующей напряженности поля h . Магнитные свойства такого образца определяются внутренним полем

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

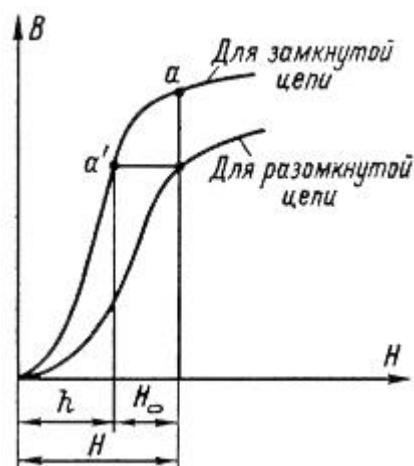


Рисунок 1.4 – Основные кривые намагничивания для замкнутой и разомкнутой магнитной цепи

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.

Сопоставляя кривые намагничивания вещества и тела, следует сделать следующее замечание. Чем больше коэффициент размагничивания, то есть чем короче и толще образец, тем более пологий вид имеет кривая намагничивания тела. Из этого получается, что при больших воздушных зазорах ход кривой намагничивания определяется преимущественно не магнитными свойствами материалов, а конструкцией цепи [3].

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

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

которое предусматривает, как свойства материала, так и конструкцию магнитной цепи.

Магнитная проницаемость тела неизменно меньше проницаемости вещества и меньше зависит от напряженности намагничивающего поля, в том числе от изменений, стимулированных внешними причинами (температурой,

механическими напряжениями и т.п.). Следовательно, стабильность свойств разомкнутой цепи выше стабильности замкнутой цепи из того же материала. Эту особенность предусматривают на практике. Для повышения стабильности ферритовых магнитопроводов в них изредка намеренно вводят воздушные зазоры, но при этом уменьшается проницаемость.

1.2.2 Петля гистерезиса

Процесс технического намагничивания, за исключением области с постоянной проницаемостью и области парапроцесса, является необратимым. Если после достижения в процессе намагничивания некоторой величины намагниченности (или индукции B), соответствующей точке A (рис. 1.5), уменьшить величину напряженности магнитного поля, то намагниченность (индукция) будет изменяться по кривой, отличной от кривой первоначального намагничивания. Это явление называется гистерезисом. При циклическом перемагничивании кривая намагничивания образует петлю гистерезиса.

Петлю гистерезиса, полученную при условии насыщения, называют предельной. В справочных материалах, как правило, приводятся симметричные предельные петли гистерезиса.

Если намагничивание совершается так, как изображено стрелками на рисунке 1.5, (а), то при однократном прохождении петли точка A и A' , соответствующие одному и тому же полю H , не совпадают, что можно объяснить различной для этих точек магнитной историей. Для получения более определенной симметричной (установившийся) петли (рис 1.3, б) при изменениях в цепях постоянного тока делают так называемую магнитную подготовку, которая заключается в многократном (5-10 раз) коммутировании тока в намагничивающей обмотке после установления его значения. Форма петли для данного материала зависит от значения поля H_{max} . Для слабых полей она имеет вид эллипсов, с увеличением поля у нее начинают вытягиваться «носки», соответствующие точкам A_1 и A_2 (рис. 1.5, б).

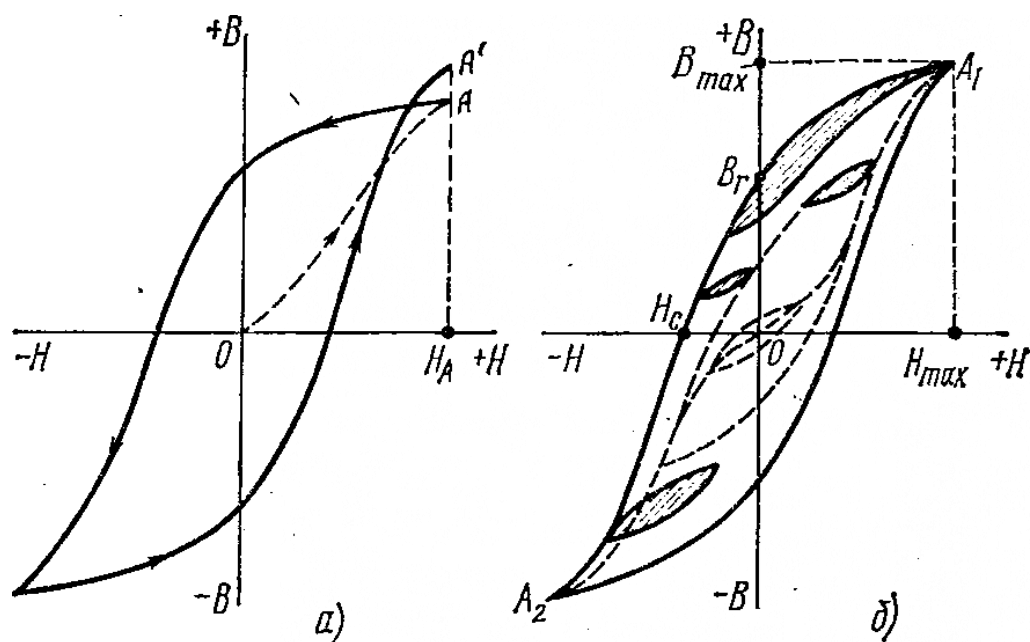


Рисунок 1.5 – Петли гистерезиса

Если несколько раз изменять напряженность магнитного поля, в которое помещен образец, от $+H_{max}$ до $-H_{min}$ и обратно, то петля гистерезиса будет каждый раз несколько 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 остаточная индукция B_r , коэрцитивная сила H_c и площадь петли, характеризующая потери на гистерезис P_g за один цикл перемагничивания.

Остаточной индукцией B_r называют индукцию которая остается в предварительно намагниченном образце после снятия внешнего магнитного поля.

Коэрцитивная сила H_c — это размагничивающее поле, которое должно быть приложено к предварительно намагниченному образцу, для того чтобы индукция в нем стала равной нулю. При изображении петли гистерезиса в координатах $B_i = f(H)$ (рис. 1.6) остаточная индукция сохраняет то же значение, что и в координатах $B = f(H)$, а коэрцитивная сила по намагниченности H_c отличается от коэрцитивной силы по магнитной индукции H_c . Для большинства применяемых в технике магнитных материалов разница между этими величинами незначительна, однако для некоторых материалов (магнитотвердых с большими значениями коэрцитивной силы) H_c и H_c могут отли-

чатся очень сильно.

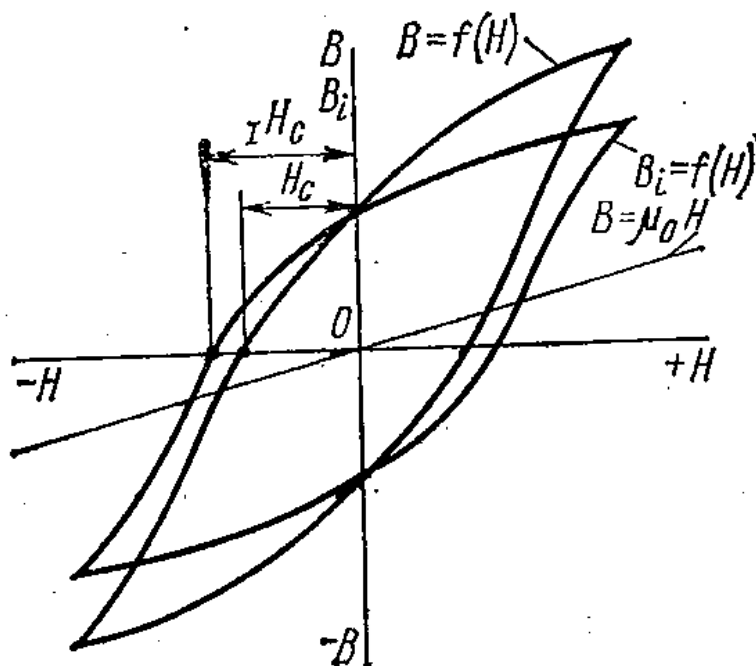


Рисунок 1.6 – Петли гистерезиса в координатах

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

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

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

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

где γ – плотность материала, кг/м^3 .

Большое значение для материалов, применяемых в постоянных магнитах, имеет размагничивающий участок петли гистерезиса — ее часть, расположенная во втором квадранте.

Кроме петли гистерезиса, вершины которой соответствуют основной кривой намагничивания, во многих случаях рассматривают так называемые частные петли гистерезиса, у которых вершины не лежат на основной кривой. Примеры частных петель приведены на рисунке 1.5, б (они заштрихованы). Особое значение имеют частные петли возврата, получающиеся при уменьшении размагничивающего поля.

1.3 Краткая классификация современных магнитотвердых материалов и их свойств

В разных магнитотвердых материалах природа высоких значений коэрцитивной силы формируется одним из трех механизмов задержки процессов перемагничивания в ферромагнетиках: необратимым вращением намагниченности магнитных доменов, задержкой образования и (или) роста зародышей перемагничивания и закреплением доменных стенок на различных неоднородностях и структурных несовершенствах кристалла [4].

С целью извлечения высокой коэрцитивной силы в магнитных материалах помимо подбора химического состава применяют технологии, оптимизирующие кристаллическую структуру и затрудняющие процесс перемагничивания. Это закалка сталей на мартенсит, дисперсионное твердение сплавов, создание высоких внутренних механических напряжений и другое. В результате усложняются процессы смещения доменных границ. У высококоэрцитивных сплавов магнитная текстура создается путем их охлаждения в сильном магнитном поле.

Избежать процедуры перемагничивания благодаря движению доменных стенок можно, например, создав структуру, в которой мелкие однодоменные частицы ферромагнитного вещества находятся в окружении прослоек парамагнитного вещества. В этом случае перемагничивание может быть реализовано вследствие вращения вектора домена, что возможно только в сравнительно больших полях. Такая структура, состоящая из однодоменных частиц, образуется либо при мелком размоле ферромагнетика, с последующим смешиванием его с парамагнитным связующим веществом и спеканием, или же при использовании разделения однородного твердого раствора на две фазы (парамагнитную и ферромагнитную). Для затруднения вращения вектора домена используют вещества с очень сильной магнитной анизотропией (некоторые типы ферритов) или обеспечивают вытянутую форму доменов (в сплавах). Все параметры увеличиваются при одинаковой ориентации осей легкого намагничивания (или в ряде случаев длинных осей доменов) вдоль

одного направления. Магнитотвердые материалы намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в сравнительно сильных магнитных полях.

Применяют магнитотвердые материалы для производства постоянных магнитов и классифицируют их по основному способу получения материала.

В связи с этим укажем основные группы:

а) Литые магнитотвердые материалы.

К этой группе относятся сплавы систем Fe—Ni—Al (ални) и Fe—Ni—Co—Al, модифицированные различными добавками. Литые высококоэрцитивные сплавы являются основными промышленными материалами для изготовления постоянных магнитов. Они являются активными элементами многих приборов и характеризуются благоприятным соотношением между магнитными свойствами и стоимостью производства. Их магнитные характеристики: H_c 30-110 кА/м, удельная магнитная энергия W_m 3-30 кДж/м³.

Магнитная текстура высококоэрцитивных сплавов создается путем их охлаждения в сильном магнитном поле. При этом достигается упорядоченное расположение пластинчатых выделений сильномагнитной фазы, которые своими осями легкого намагничивания ориентируются в направлении поля. Такое магнитное текстурирование эффективно лишь для сплавов с высоким содержанием кобальта. Текстурированный материал магнитно анизотропен, наилучшие свойства у него обнаруживаются в том направлении, в котором при охлаждении на него действовало магнитное поле. Кристаллическую текстуру создают методом направленной кристаллизации сплава, залитого в форму, используя особые условия теплоотвода. Сплавы, полученные направленной кристаллизацией, имеют специфическую столбчатую структуру. Сочетание кристаллической и магнитной текстур позволяет улучшать все параметры магнитотвердого материала [4].

Бескобальтовые сплавы наиболее дешевые. Сплавы, содержащие кобальт, применяются в тех случаях, когда требуются повышенные магнитные свойства и нужен изотропный магнитный материал. Сплавы с 24% кобальта (магнико), обладающие высокими магнитными свойствами в направлении

магнитной текстуры, используют при направленном магнитном потоке. Сплавы с направленной кристаллизацией обладают наибольшим запасом магнитной энергии.

б) Магнитотвердые ферриты.

Магнитотвердые ферриты (оксидные магниты) — это ферритмагнетики с большой кристаллографической анизотропией. Применяются главным образом 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 $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$. Ферриты бария и стронция имеют гексагональную кристаллическую решетку с одноосной анизотропией. Высокая коэрцитивная сила у этих материалов обусловлена малым размером кристаллических зерен и сильной магнитной кристаллографической анизотропией. Технология их получения аналогична технологии приготовления керамики. Для получения мелкокристаллической структуры осуществляют тонкий помол, а спекание проводят при относительно невысоких температурах, чтобы исключить процесс рекристаллизации. Для придания анизотропии магнитных свойств материал текстурируют. Текстура создается путем формования массы в сильном магнитном поле.

В зависимости от технологии изготовления магниты на основе феррита бария могут быть изотропными и анизотропными. Ферриты кобальта имеют кубическую структуру и получают их по той же технологии, что и ферриты бария. Основное отличие заключается в термомагнитной обработке спеченных магнитов.

Магнитные свойства магнитотвердых ферритов: H_c — 120-240 кА/м, W_m — 3-18 кДж/м³. Магниты из ферритов можно использовать при высоких частотах, что связано с высоким удельным сопротивлением. У бариевых ферритов, например, $\rho=104-107$ Ом·м. Недостатки магнитотвердых ферритов — низкая механическая прочность большая хрупкость и твердость, сильная зависимость магнитных свойств от температуры.

в) Сплавы с редкоземельными металлами.

Редкоземельные элементы (РЗЭ) образуют большое число бинарных соединений с металлами переходной группы, обладающих высокими магнитными свойствами. Наибольший интерес представляют соединения RCo_5 и R_2Co_{17} , где R — редкоземельный металл (самарий, празеодим, церий); кобальт может быть частично замещен медью или железом. Эти соединения имеют гексагональную структуру и им присуща сильная магнитная анизотропия и высокая температура Кюри. Наиболее высокая намагниченность насыщения наблюдается у соединений кобальта с элементами первой половины ряда лантаноидов, что обусловлено ферромагнитным упорядочением спинов атомов РЗЭ и атомов кобальта в этих соединениях. При температуре ниже некоторого критического значения соединения RCo_5 метастабильны и распадаются на две фазы. Нарушение фазовой однородности является одной из причин проявления высокой коэрцитивной силы в материале. У материалов на основе РЗЭ $H_c = (560-800)$ кА/м, $W_m = (56-80)$ кДж/м³.

Магниты из этих сплавов получают наиболее часто жидкофазным спеканием из порошков. Например, магниты на основе SmCo_5 спекаются после прессования при температуре 1100 °С в течение 30 мин в атмосфере чистого аргона. Магниты из этих соединений должны быть защищены от окисления покрытиями из металла или оксидных пленок. Основные их недостатки — высокая хрупкость и высокая стоимость.

г) Композиционные магнитотвердые материалы.

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

Постоянные магниты, которые производят из смеси магнитного порошка и полимерных связующих называют магнитопластами. Они поддаются механической обработке, благодаря пластичности (как резина) и возможности изготовления сложных форм методом литья под давлением (в том числе, с монтажными отверстиями и средствами крепления). Не нагреваются при работе в переменных электромагнитных полях (нечувствительны к воздей-

ствию вихревых токов). Максимальная рабочая температура - до 120-220 градусов Цельсия, в зависимости от теплостойкости связующего материала. Преимуществами магнитопластов перед спеченными магнитами являются более простая, доступная, высокопроизводительная и дешевая технология изготовления, стойкость к коррозии и, соответственно, большой срок службы, возможность изготовления изделий сложной формы с высокой точностью и со сложной конфигурацией магнитных полюсов.

Для изготовления магнитного порошка используются феррит бария (стронция), сплавы неодим-железо-бор, самарий-кобальт, алнико, их всевозможные смеси, а также другие материалы. В качестве связующего полимера могут применяться эпоксидные, фенольные и полиэфирные смолы, термопласты (на основе полиамида, поливинилхлорида, полистирола), эластомеры (винил, нитриловая резина, каучук). Содержание магнитного порошка в исходной смеси может достигать 76 % по объему или 94 % по массе, при этом дисперсный состав должен быть достаточно широким, однако магнитные характеристики (например, коэрцитивная сила) увеличиваются с уменьшением размера частиц до определенного предела (~1-4мкм). От состава магнитного порошка и его содержания в исходной смеси зависят магнитные характеристики получаемого магнитопласта.

Все применяемые магнитные наполнители характеризуются достаточно высокой твердостью, и их измельчение сопряжено со значительными трудностями. Наибольшей эффективностью обладают частицы продолговатой формы, обеспечивающие более высокий уровень намагничивания.

Для того чтобы магнит был намагничен до насыщения, необходимо выполнять условие

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

Таким образом 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

Выводы: Приведенные материалы в главе 1 необходимы для понимания процессов, происходящих в магнитотвердых материалах, что позволяет в дальнейшем выбрать оптимальный режим намагничивания.

2. ТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ НАМАГНИЧИВАНИЯ МАГНИТОТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

2.1 Общие соображения по намагничиванию постоянных магнитов из магнитотвердых материалов

Различают намагничивание образцов (отдельных постоянных магнитов) из магнитотвердого материала и намагничивание реальной магнитной системы, в состав которой в состав которой помимо постоянного магнита входят и другие элементы. В последнем случае намагничивают не отдельно сам постоянный магнит (до сборки), а всю магнитную систему целиком (намагничивание после сборки). Дело в том, что после сборки системы индукция в магните, а, следовательно, и в рабочем зазоре повышается (см. рис. 1.1). Надо также учесть трудности технологического характера, которые возникают при сборке системы с предварительно намагниченным магнитом.

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 стоит помнить, что помимо значения H_{max} следует учитывать и конфигурацию постоянного магнита (форму, направление магнитной текстуры и т.п.).

Исходя из вышесказанного, для исследования свойств самого широкого спектра современных магнитотвердых материалов необходимы намагничивающие поля от $50 \div 10000$ кА/м. Продолжительность намагничивания диктуется экранирующим действием вихревых токов, влияющих на процесс намагничивания и колеблется в пределах от единиц микросекунд до единиц миллисекунд.

Минимальная продолжительность воздействия намагничивающего поля H_{max} можно приближенно 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 постоянных магнитов и магнитных систем проводят в специальных намагничивающих установках и устройствах.

Наибольшее применение получили намагничивающие установки постоянного тока (электромагниты, соленоиды) и импульсные установки.

2.2.1 Намагничивающие установки на постоянном токе – электромагниты

Существуют намагничивающие установки постоянного тока — электромагниты и соленоиды. Их преимуществом перед другими видами намагничивающих устройств является отсутствие влияния вихревых токов. Значительно реже используются намагничивающие устройства с постоянными магнитами, пригодные только для намагничивания мелких магнитов [6]. Больше всего электромагниты и соленоиды пригодны для намагничивания прямоосных магнитов (параллелепипеды, стержни и т. п.). В случае использования электромагнитов постоянные магниты зажимают между полюсами электромагнита, включают ток, извлекают магнит после отключения тока. При намагничивании магнитов другой формы, в том числе криволинейных, стремятся использовать распределение магнитного поля на периферии полюсных наконечников электромагнита, применяют сменные полюсные наконечники. При намагничивании магнитов совместно с арматурой необходимо увеличивать намагничивающее поле с тем, чтобы материал арматуры, намагничиваясь до насыщения, возможно меньше искажал характер магнитного

поля в зазоре электромагнита. Недостатками намагничивающих установок постоянного тока являются большая масса и габариты, большая потребляемая мощность, невозможность намагничивания магнитов сложной формы, в частности, многополюсных; ограниченная напряженность намагничивающего поля. Действительно, большинство электромагнитов обеспечивает в зазоре 30...100 мм напряженность поля 400 – 1500 кА/м; уникальные многотонные электромагниты с концентрирующими пермендюрowymi полюсными накопниками обеспечивают напряженность 2800...3000 кА/м лишь в зазоре 10...20 мм.

Часто особенно на заводах, выпускающих постоянные магниты, используют намагничивающие устройства по типу электромагнита, которые называются пермеаметрами.

Конструкция пермеаметра зависит от предъявляемых к нему требований: максимальной величины намагничивающего поля, метода измерения его напряженности, метода определения индукции, формы и размеров образцов, требуемой точности измерений. Поскольку нашей задачей является намагничивание, то мы будем рассматривать пермеаметры как устройства намагничивания.

Основными частями пермеаметра являются ярмо, намагничивающие катушки и устройства для определения напряженности магнитного поля и индукции [6].

Ярмо пермеаметра служит для создания (вместе с образцом) замкнутой (или близкой к замкнутой) магнитной цепи. Схематическое устройство пермеаметра показано на рисунке 2.1. Основные детали пермеаметра: Я — ярмо из магнитномягкого материала; О — образец; ω_1 — намагничивающая обмотка; ω_2 — измерительная обмотка индукции.

Из расчета магнитной цепи пермеаметра следует, что определение напряженности намагничивающего поля по току

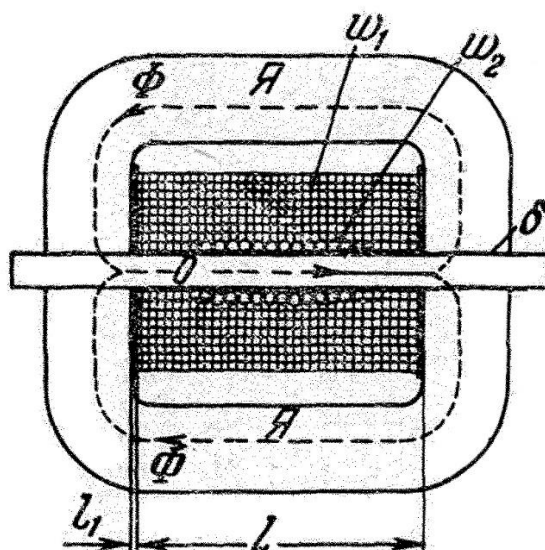


Рисунок 2.1 – Устройство пермеаметра

в намагничивающей обмотке возможно только при соблюдении следующих условий:

- а) Намагничивающая катушка должна покрывать всю часть образца между полюсами ярма.
- б) Воздушный зазор между полюсами ярма и образцом должен быть как можно меньше и образец должен касаться ярма всей торцевой поверхностью.
- в) Сечение ярма пермеаметра и проницаемость материала, из которого оно изготовлено, должны быть значительно больше сечения и проницаемости образца.

Опишем конструкцию пермеаметра со специальными измерительными катушками поля и потенциалометром для измерения напряженности намагничивающего поля. Для исследования магнитных характеристик высококоэрцитивных сплавов предназначен пермеаметр с двумя измерительными катушками поля (пермеаметр Санфорда и Бенетта).

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.

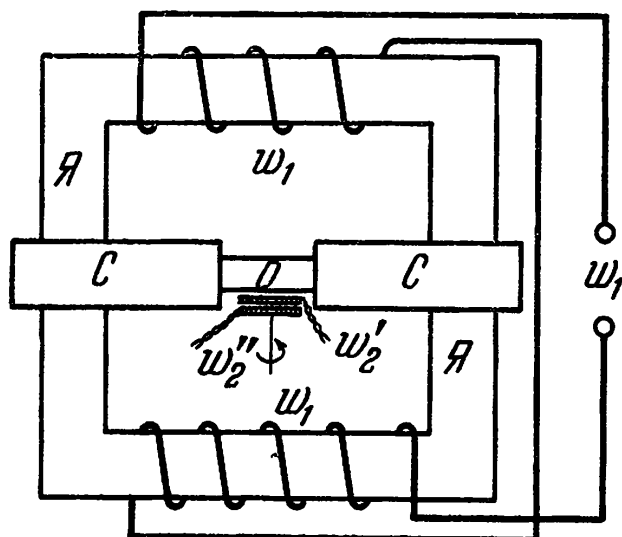


Рисунок 2.2 – Схематическое устройство пермеаметра с двумя катушками поля

Описываемый тип пермеаметра применяется редко из-за ряда недостатков, в том числе большого рассеяния потока вследствие неудачного расположения намагничивающих катушек; отсюда — малые размеры ярма и по существу специальная форма и ограниченные размеры образца.

Существуют устройства с катушками намагничивания, в которых большие магнитные поля можно получить с помощью применения не до конца замкнутых ферромагнитных магнитопроводов (пермеаметры). Самым похожим к предлагаемому техническому решению является пермеаметр, содержащий магнитопровод с зазором для установки испытуемого образца и обмотку намагничивания, состоящую из двух катушек, симметрично расположенных относительно зазора магнитопровода. В нем образец материала испытывается в условиях «не полностью замкнутой магнитной цепи», когда между образцом и полюсами магнитопровода имеются неоднородность магнитного поля в зазоре между полюсами магнитопровода: вдоль направления намагничивания напряженность магнитного поля минимальна в средней части зазора и возрастает к полюсам; в поперечном направлении напряженность убывает от оси симметрии магнитного поля. При этом неоднородность магнитного поля тем выше, чем больше зазор между полюсами магнитопровода.

Существенным недостатком пермеаметров для постоянных магнитов является их громоздкость. Для создания больших полей необходима значительная н. с., достигающая 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.

Для создания сильных магнитных полей (порядка 1 000—40 000 А/см) и намагничивания образцов широко применяют электромагниты различных конструкций. Применяя специальные формы электромагнитов и полюсных наконечников, можно осуществить намагничивание образцов самых разнообразных форм и размеров. Схематическое устройство простого электромагнита показано на рис. 2.3.

Электромагниты различаются формой, размерами и местом расположения намагничивающей обмотки. Опыт показывает, что наиболее рационально располагать обмотки вблизи полюсов электромагнита. Чем выше индукция в зазоре электромагнита, тем меньше КПД его обмотки. Тут условно КПД обмотки электромагнита мы называем процентное отношение н. с., приходящейся на воздушный зазор (напряженность поля в зазоре, умноженная на его длину), к полной н. с. обмотки.

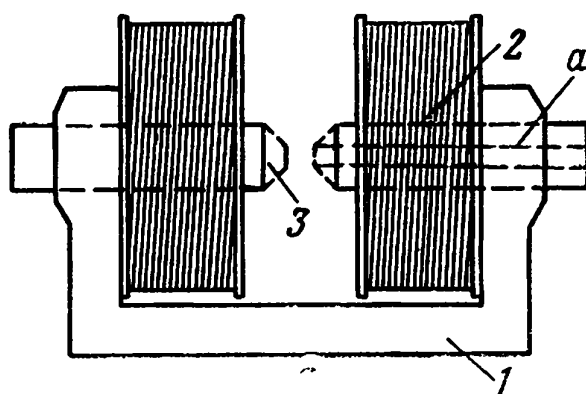


Рисунок 2.3 – Схематическое устройство электромагнита

1— магнитопровод, 2 — намагничивающая обмотка, 3 — полюсные наконечники.

Максимальный КПД электромагнитов 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%.

Приведем пример электромагнита для создания больших 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 добиться путем изготовления полюсов из пермендюра и придания полюсным наконечникам конической формы, как показано на рис. 2.3 пунктиром. Такие изменения в конструкции описываемого электромагнита позволяют получить в зазоре 12,5 мм напряженность поля до 20000 А/см. Уменьшению потоков рассеяния способствует отсутствие острых углов в сердечнике магнитопровода. Большие напряженности поля могут быть получены лишь за счет значительного увеличения размеров магнитопровода электромагнита. Так, для получения напряженности поля около 40000 А/см в небольшом объеме 20—25 см³ вес сердечника электромагнита должен составлять уже 8—10 т.

Наиболее широко распространены простые формы электромагнитов, представляющие собой ярмо из низкоуглеродистой стали или листовой электротехнической стали с одним подвижным полюсом для намагничивания образцов различной длины. Максимальная напряженность поля, необходимая для доведения большинства магнитотвердых материалов до насыщения, равна примерно 2 000 А/см (кроме сплавов на основе драгоценных металлов и некоторых марок ферритов, для намагничивания которых нужны поля, в 2—4 раза сильнее).

Обычно магниты в форме параллелепипеда или цилиндра не делают очень длинными, поэтому почти для всех практических случаев достаточно максимальное расстояние между полюсами электромагнита 150—200 мм.

Иногда в неподвижном полюсе электромагнита делают сквозное отверстие диаметром 10—20 мм, служащее для измерения намагниченности насыщения. В тех случаях, когда нет мощного источника постоянного тока, можно, производить намагничивание по безгистерезисной кривой намагничивания, т. е. наложением переменного поля убывающей амплитуды на постоянное магнитное поле небольшой величины.

Такого рода намагничивание удобно производить в электромагнитах, магнитопровод которых представляет собой пакет, собранный из пластин листовой электротехнической стали.

Постоянное магнитное поле создается дополнительной обмоткой на намагничивающих катушках электромагнита. При этом максимальная амплитуда переменного тока должна быть примерно равна величине постоянного тока, необходимого для намагничивания магнита до насыщения обычным способом. Величина постоянного магнитного поля при намагничивании по безгистерезисной кривой для сплавов альни-альнико должна быть равна $80 \sim A/cm$.

Дугообразные магниты неудобно намагничивать в электромагнитах, так как при этом магнитная проводимость между полюсами электромагнита, сближенными на расстояние, равное расстоянию между ножками дугообразного магнита, может быть больше, чем проводимость по магниту, и последний не намагнитится до насыщения. Магниты таких форм (речь идет в основном о высококоэрцитивных сплавах, так как намагничивающие устройства, годные для них, заведомо годны для сталей мартенситного типа) 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. В ряде случаев форма магнита или магнитной системы не позволяет намагничивать его обычными методами — в электромагните или с помощью намагничивающих катушек. Тогда намагничивание производят с помощью одного провода большего сечения, проходящего в центре магнитной систе-

мы. Для намагничивания постоянных магнитов требуются поля порядка нескольких тысяч ампер на сантиметр; следовательно, при намагничивании одним проводом по последнему. должен идти ток в десятки тысяч ампер.

Для намагничивания постоянных магнитов сложных форм, особенно магнитов с несколькими полюсами, приходится применять специальные намагничивающие устройства. Недостаток таких устройств заключается в том, что они обычно пригодны лишь для одной формы и одного размера магнита.

2.2.2 Намагничивающие установки в виде соленоидов

В магнитных измерениях для создания в некотором объеме пространства магнитных полей широко используются различного рода катушки (соленоиды). В соленоидах обычно намагничивают в процессе измерений образцы прямолинейной формы: цилиндры, параллелепипеды, эллипсоиды вращения и др.

Намагничивающая катушка представляет собой цилиндрический каркас, чаще всего из изоляционного материала, на который намотано некоторое число слоев провода. Расчет намагничивающей катушки не преследует обычно целей точного определения коэффициента пропорциональности k между током и напряженностью магнитного поля в катушке.

$$H = kI$$

Коэффициент k определяют экспериментально после изготовления катушки. Расчет необходим: 1) для примерного определения максимальной величины магнитного поля, которую можно получить в центре катушки, и 2) для нахождения распределения напряженности поля по оси катушки. Эта формула строго верна лишь для бесконечно длинной катушки: чем короче катушка, тем большая погрешность имеет место при расчете напряженности поля. При отношении длины катушки к диаметру, равном 40—50 погрешность расчета поля обычно не превышает 2%.

В ряде случаев требуется катушка со значительной зоной однородного поля. По аналогии с образцами эллипсоидальной формы можно изготовить катуш-

ку в форме эллипсоида вращения. Известно, что в эллипсоидальных образцах индукция постоянна во всех точках.

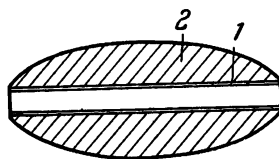


Рисунок 2.4 – Эскиз каркаса эллипсоидальной катушки

Эллипсоидальные намагничивающие катушки отличаются от обычных цилиндрических тем, что намотка их выполнена на каркасе в форме эллипсоида вращения (рис. 2.4).

Изготовление эллипсоидальных катушек представляет значительные технологические трудности. Практически очень трудно изготовить эллипсоидальную катушку с напряженностью поля в ней больше 200—300 А/см. В случае, когда требуется катушка со значительной величиной зоны равномерного поля, эту зону можно увеличить в цилиндрических катушках с помощью дополнительных обмоток на краях.

Для получения в намагничивающей катушке магнитного поля с напряженностью порядка нескольких тысяч ампер на сантиметр приходится пропускать по обмотке токи большой плотности, вызывающие сильный ее нагрев. Поэтому для катушек, рассчитанных на сильные поля, необходимо предусматривать охлаждение. Что значительно усложнит конструкцию, поэтому заменой таким соленоидом послужит сверхпроводящий соленоид.

Открытие сплавов с высокими критическими магнитными полями привело к созданию мощных соленоидов и магнитов со сверхпроводящими обмотками. Полное отсутствие электрического сопротивления выгодно отличает новые магниты от устройств для получения магнитного поля, описанных выше. Подобно постоянным магнитам сверхпроводящие магниты являются конденсаторами магнитной энергии, но только несравненно более мощными. КПД. сверхпроводящих магнитов может быть доведен до 100%, в то время как КПД. обычных магнитов при генерации магнитного поля в непрерывном режиме стремится к нулю. Освобождение от громоздких источников питания

и систем водяного охлаждения делает новые магниты портативными приборами, значительно снижает их стоимость. Особенно наглядно достоинства сверхпроводящих магнитов проявляются, когда нужно получить сильное магнитное поле в большом объеме. Стоимость сверхпроводящих соленоидов примерно равна стоимости эксплуатационных расходов для обычных соленоидов с медной обмоткой.

Сверхпроводящий соленоид отличается от обычного, во-первых, тем, что электрическое сопротивление его обмотки равно нулю, и, во-вторых, тем, что при некотором значении тока, называемом критическим и являющемся функцией магнитного поля, сверхпроводимость исчезает.

При создании сверхпроводящих соленоидов, рассчитанных на предельно высокую напряженность магнитного поля, главным ограничением являются очень большие пондеромоторные силы. Область достижимых магнитных полей значительно расширяется, если использовать так называемые «бессиловые» конфигурации. Пондеромоторная сила определяется как векторное произведение векторов плотности тока и напряженности магнитного поля. Она равна нулю, если эти векторы коллинеарны. В реальном соленоиде должна существовать область, где есть магнитное поле, но нет токов. Поэтому создать полностью бессиловую конфигурацию поля соленоидального типа, по-видимому, невозможно. Этот вывод следует из закона сохранения энергии.

Если устранить пондеромоторные силы полностью нельзя, то ослабить, их действие — вполне реальная задача. «Бессиловая» конфигурация как бы преобразует высокое давление, действующее в малой области, в низкое давление, распространенное на большую область. При этом способность соленоида противостоять разрушающему действию пондеромоторных сил значительно возрастает.

Простейшую бессиловую конфигурацию обеспечивает тонкая проводящая лента, навитая под углом 45° к оси бесконечно длинного цилиндра (рис.2.5, а). Ток через ленту генерирует азимутальное и осевое магнитные

поля одинаковой напряженности, так что результирующее поле параллельно току. При движении вдоль ленты вектор магнитного поля вращается, не меняясь по абсолютной величине. Поэтому не меняется плотность магнитной энергии, а значит, давление $p = \text{grad } H^2 = 0$. На рисунке 2.5, б изображен «бессиловой» цилиндр конечной толщины, имеющий многослойную обмотку. В каждом последующем слое лента повернута на небольшой угол относительно ленты в предыдущем слое.

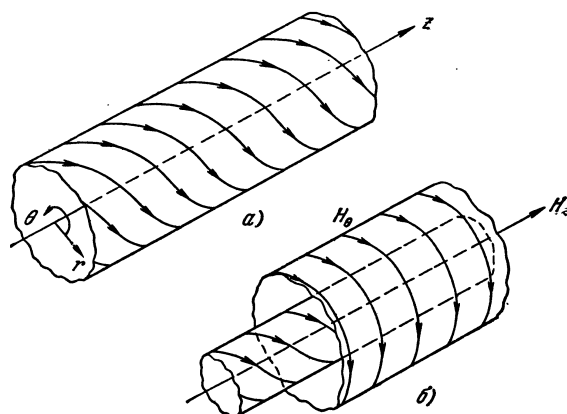


Рисунок 2.5 – Бессиловая конфигурация соленоида

Опыт, накопленный при исследовании катушек с малыми рабочими объемами, позволил приступить к сооружению соленоидов значительных размеров, с большими рабочими объемами. Такие соленоиды имеют ряд конструктивных и эксплуатационных особенностей. Конструктивные особенности их связаны с заметной величиной пондеромоторных сил, а также необходимостью иметь в рабочем объеме в некоторых случаях комнатную температуру. Для противодействия пондеромоторным силам соленоид можно разбить на секции, расположенные одна над другой, и снабдить их прочной металлической поддержкой. Если поблизости от соленоида расположен второй работающий соленоид, или магнит, или железо, то необходимо принять дополнительные меры против сил притяжения, действующих между соленоидом и ними.

Сверхпроводящие соленоиды крупных размеров размещаются в металлических криостатах. Криостаты должны быть достаточно прочными, так как

при работе соленоида в окружающем пространстве концентрируется значительная магнитная энергия. При случайном переходе обмотки в нормальное состояние, вызванном понижением уровня жидкого гелия или обрывом проволоки, эта энергия перейдет в тепловую, гелий начнет быстро испаряться, давление в криостате возрастет, и может произойти взрыв.

2.2.3 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.

Намагничивание постоянных магнитов (ПМ) в импульсных полях значительно различается от намагничивания в стационарном или медленно изменяющемся магнитном поле. Ему присуще несколько особенностей, главные из которых заключаются в следующем:

- Возможность применения сильных намагничивающих полей с малыми энергетическими затратами;
- Кратковременность воздействия импульсного поля на образец, приводящая при больших скоростях изменения поля к явлениям поверхностного экранирующего эффекта и недостаточному намагничиванию внутренних областей ПМ;
- Нагрев ПМ с высокой удельной проводимостью вследствие возникновения вихревых токов;
- Возможность применения простых индукторных систем, реализующих намагничивание ПМ;

Главное достоинство такого способа намагничивания перед другими состоит в том, что намагничивающие установки могут создавать достаточно

сильные магнитные поля при сравнительно малой потребляемой из сети мощности.

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 это, в качестве системы питания для НУ, может использоваться ограниченный тип электротехнических устройств (рис. 2.6).

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

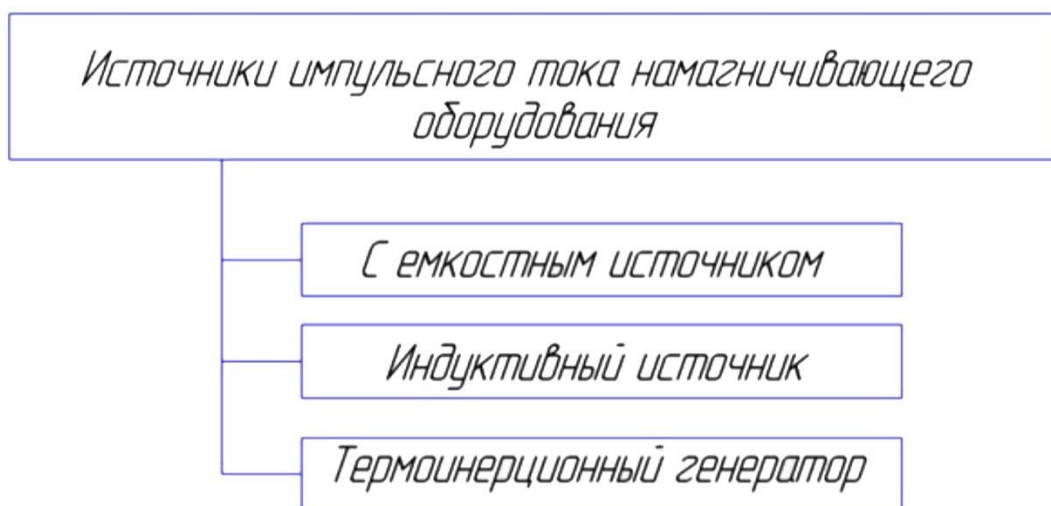


Рисунок 2.6 Классификация источников импульсного тока

Как видно из рисунка 2.6, электрическая энергия может быть накоплена и преобразована в источниках энергии различных типов.

Наиболее широко в настоящее время применяются импульсные установки с емкостным источником тока.

Принцип работы импульсных намагничивающих установок основан на сравнительно длительном накоплении электрической энергии, равной десяткам килоджоулей, в конденсаторной батарее и кратковременном разряде через выпрямляющее устройство (для исключения колебаний в системе).

Намагничивающие катушки применяют как стационарные, так и наматываемые непосредственно на намагничиваемый магнит, 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. Однако главное преимущество — возможность получения любого распределения магнитного поля, возможность многополюсного намагничивания. Следует добавить, что по данным испытаний завода изготовителя постоянных редкоземельных магнитов, именно импульсный метод позволяет осуществить их полное промагничивание.

Выводы: Импульсный метод намагничивания постоянных магнитов является универсальным и пригоден для большого количества магнитотвердых материалов и конфигураций.

3. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ УСТАНОВОК

3.1 Выбор источника импульсного тока для намагничивающей установки

Как было показано выше (2.2.3), электрическая энергия может быть накоплена и преобразована при использовании различных видов накопителей. Рассмотрим каждый из них подробнее.

Конденсаторные батареи.

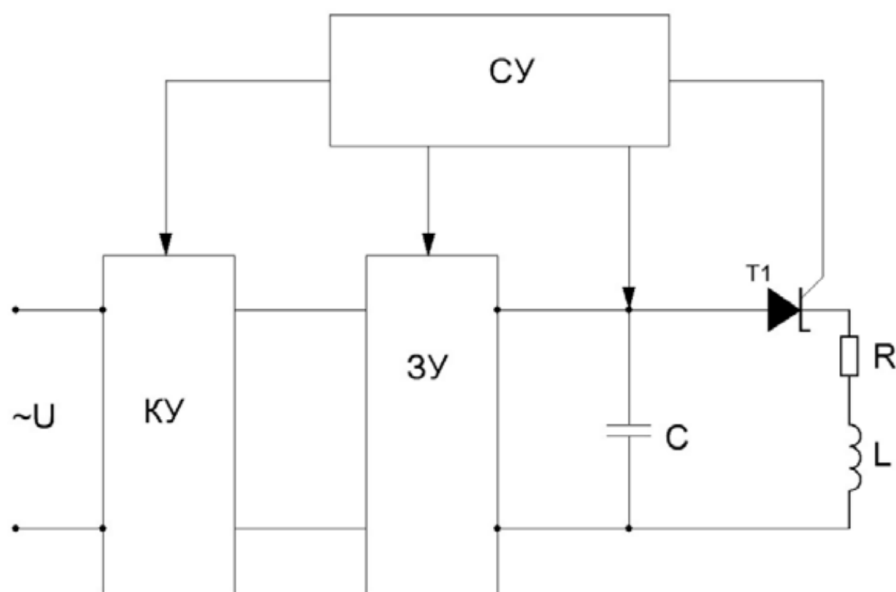


Рисунок 3.1 Структурная схема конденсаторной намагничивающей установки

На рисунке 3.1 КУ – коммутирующее устройство, ЗУ – зарядное устройство, СУ – схема управления, Т1- коммутатор (игнитрон или тиристор). Заряд емкостного накопителя энергии происходит от специального зарядного устройства, которое подключается к нему через коммутирующее устройство. Обычно в качестве коммутирующего устройства используют обычные контакторы переменного тока. Зарядное устройство представляет собой повышающий трансформатор с выпрямителем и схемой регулирования зарядного тока. Система управления обеспечивает заряд емкостного накопителя энергии до требуемого уровня, управление коммутирующим устройством и коммутатором, через который происходит разряд емкостного

накопителя энергии на нагрузку. В качестве коммутатора могут применяться игнитроны на соответствующее рабочее напряжение, либо силовые тиристоры. Мы рассмотрим возможность применения обоих ключей.

Следует отметить, что плотность запасаемой энергии в конденсаторах мала, что приводит к сравнительно большим габаритам установок. Так же серьезной проблемой является защита конденсаторов, так как вследствие выхода из строя отдельных групп батареи может бездействовать вся цепь. Поэтому необходимо устанавливать предохранители на каждую группу или даже на каждый конденсатор. Но в последнем случае возрастает стоимость батареи и ухудшаются ее параметры (увеличивается индуктивность и потери, батарея становится более громоздкой).

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.

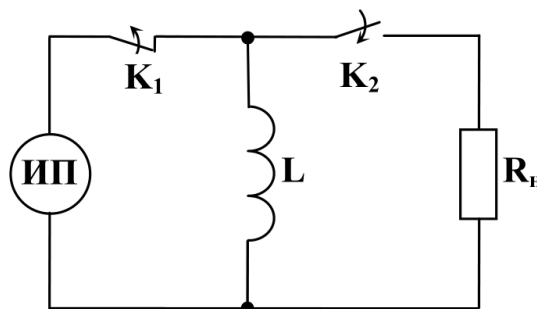


Рисунок 3.2 Схема индуктивного накопителя

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. Кроме того, внедрение в технический процесс намагничивания магнитов дополнительных громоздких систем, усложняет весь процесс и приводит к неоправданному удорожанию стоимости всей системы.

Импульсные генераторы.

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

Преимущество данных устройств состоит в том, что они могут работать с предельными значениями плотности тока в обмотках, что позволяет получить значительную импульсную мощность при минимальных

массогабаритных показателях, но в течение не продолжительного времени [8].

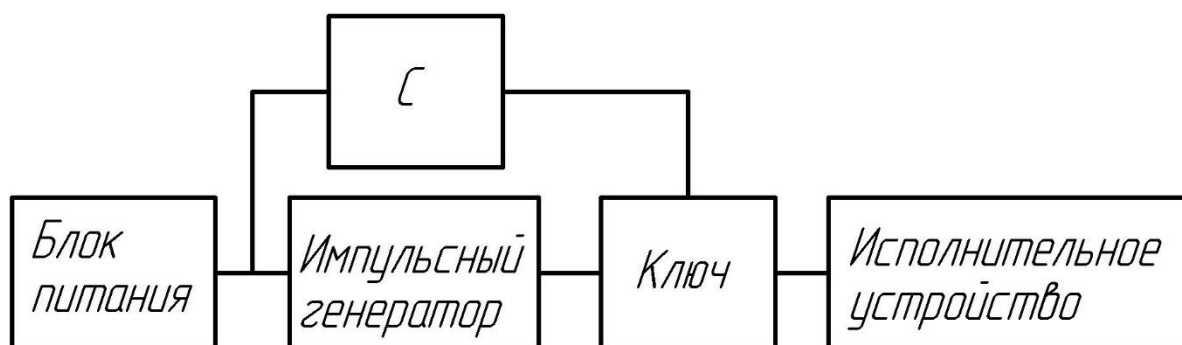


Рисунок 3.3 Структурная схема намагничивающей установки с ИГ

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; во-вторых, энергия, которую генератор отдает намагничивающему соленоиду в первую половину периода, во второй половине возвращается обратно в генератор, за счет этого кинетическая энергия, накопленная в роторе, изменяется незначительно [9]. 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.

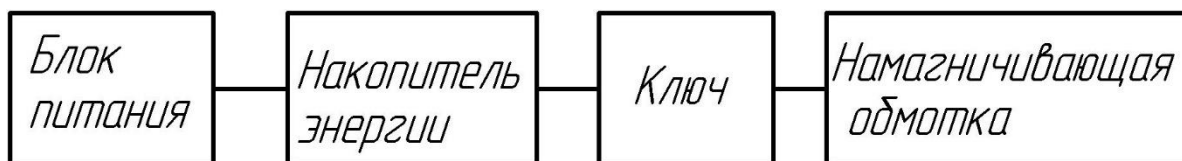


Рисунок 3.4 Структурная схема намагничивающей установки

3.2 Расчет оптимальных параметров импульсного поля, необходимого для намагничивания систем с постоянным магнитом

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 со-

ответствуют 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.

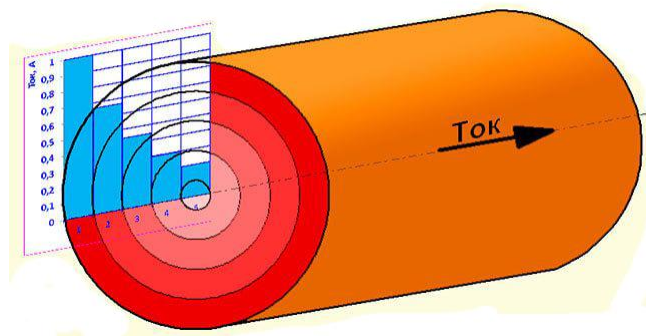


Рисунок 3.5 Распределение переменного тока по сечению стержня

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.

Прямолинейный проводник с током мы можем разделить на разрозненные нити тока, параллельные друг другу. Чем ближе такая нить лежит к оси самого проводника, тем больший магнитный поток, замыкающийся внутри проводника, ее охватывает. Индуктивность нити тока и индуктивное сопротивление пропорциональны магнитному потоку, сцепленному с ней. Из-за этого внутренние нити проводника, по которым пронизывается переменный ток, имеют большее индуктивное сопротивление, чем наружные периферийные нити. Последнее порождает неравномерное распределение тока по сечению проводника, таким образом, что плотность тока будет возрастать от оси

к поверхности проводника. Такое явление называется поверхностным эффектом. При этом с учетом поверхностного эффекта можно получить выражения для амплитудного значения напряженности поля в теле стрежня, 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

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

Модуль X_e равен:

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

Выразим ω_0 , b через τ_n и τ , тогда

$$\omega_0 = \frac{\pi}{\tau}; b = \frac{\pi}{\tau} ctg \left(\pi \frac{\tau_n}{\tau} \right). \quad (3.8)$$

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

$$x_e = d \sqrt{\frac{\mu \gamma \lambda}{4} \sqrt{1 + ctg^2 \left(\pi \frac{\tau_n}{\tau} \right)}}. \quad (3.9)$$

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

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

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 $b_{0\tau} = F_1(\tau)$,

которая представлена на рисунке 3.6. Очевидно, что величина $(b_{0\tau})_k$, которой соответствуют найденные

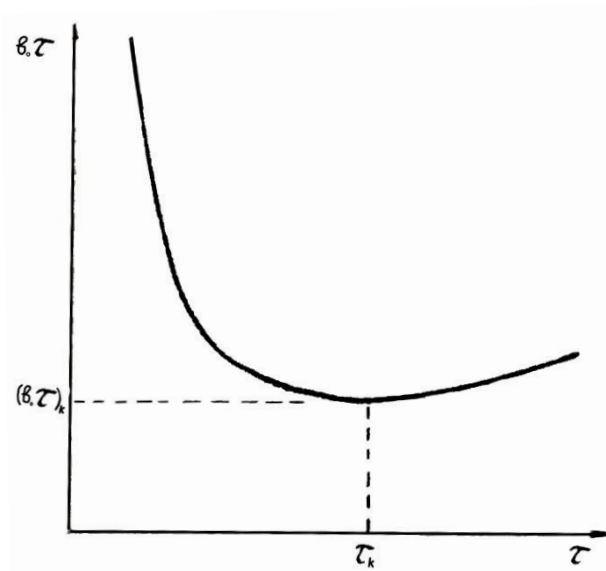


Рисунок 3.6 Зависимость функции $b_{0\tau}$ от длительности импульса τ значения H_{me} и τ_k , является оптимальным параметром для определения требуемого значения H_{me} и τ при импульсном намагничивании данного образца. Из графика $\tau = \varphi(\omega)$ по рассчитанному τ_k можно найти оптимальное число витков ω_k .

Если коэффициент затухания $b \ll \omega_0$, что часто встречается на практике, тогда уравнение (3.7) примет вид:

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

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 $(b_{0\tau})_k = \left(\frac{H_{me}}{5H_{ct}}\right)_k$, при определенном значении длительности импульса $\tau = \tau_k$.

3.3 Патентный поиск технических решений построения импульсных намагничивающих установок

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.

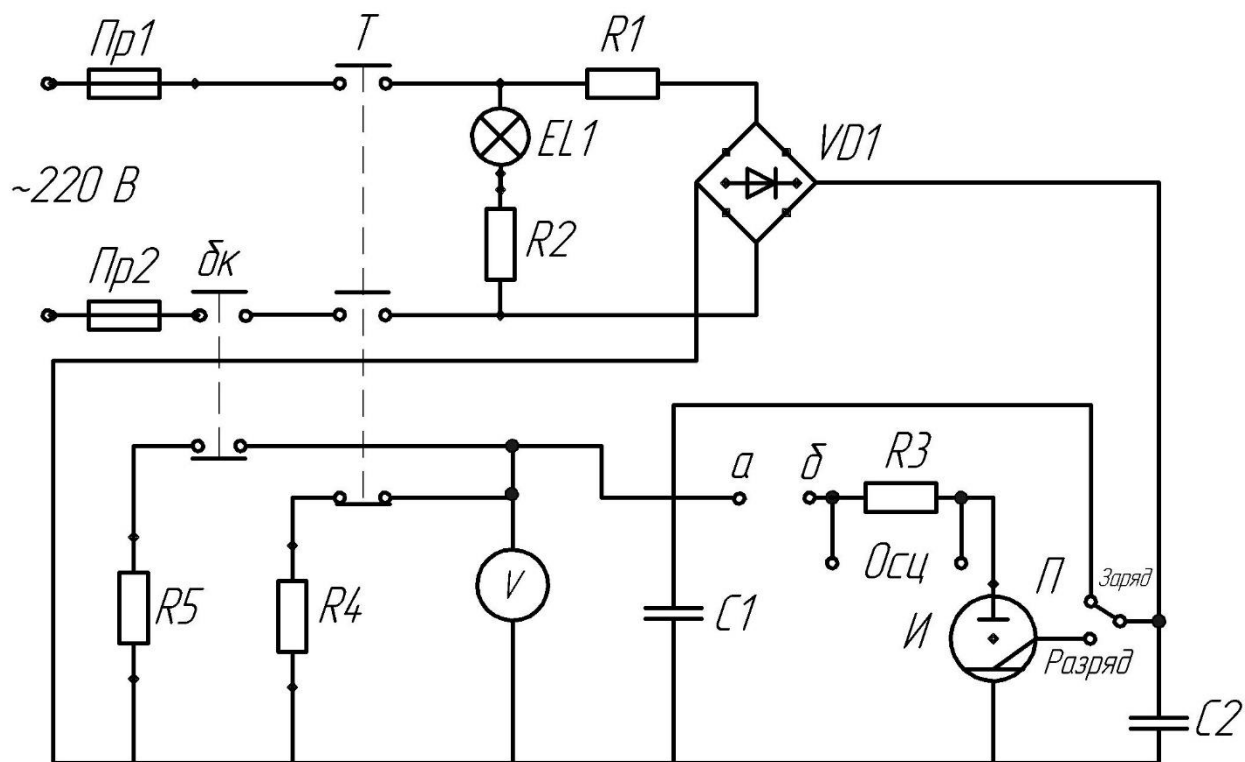


Рисунок 3.7 – Принципиальная схема установки

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 $C_1 = 8000$ 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 C_1 и C_2 . Емкость C_2 служит для поджигания игнитрона И. Одновременно с этим к C_1 подключается магнитоэлектрический вольтметр V, измеряющий текущее напряжение заряда. Для контроля наличия напряжения предусмотрена сигнальная лампа Л, включающаяся через сопротивление r_2 . 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 C_2 игнитрон зажигается и происходит разряд батареи C_1 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 C_1 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 r_5 . Блок-контакт выключается при вынимании прибора из наружного защитного корпуса. Габариты установки $340 \times 350 \times 480$ 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.

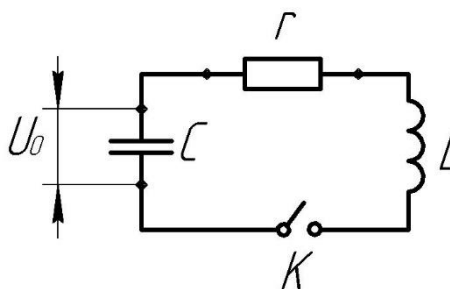


Рисунок 3.8 – Эквивалентная электрическая схема намагничивающей установки

Для работы в критическом режиме необходимо выполнить условие

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

Максимальное значение тока в цепи

$$I_{max} = \frac{0.735U_0}{r}, \quad (3.1)$$

где U_0 – напряжение заряда конденсаторов.

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

$$t_{max} = \frac{2L}{r}; \quad (3.2)$$

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

$$T = 6.4\gamma \frac{B}{H} D^2 \cdot 10^{-9}, c \quad (4)$$

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.

Для оценки качества работы установки было произведено намагничивание различных магнитных систем в мощном электромагните постоянного тока и в созданном импульсном устройстве. Заметной разницы в величине магнитной индукции в зазоре при этом не было обнаружено.

По мнению авторов, установка может быть существенно усовершенствована. В частности, создание ударного трансформатора, как показывают расчеты, позволило бы увеличить I_{max} , по крайней мере в два раза т.е. получить $I_{max}=40000$ А.

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.

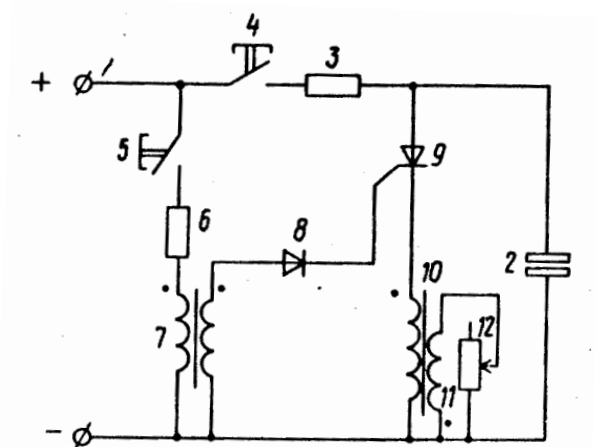


Рисунок 3.9 – Электрическая схема предлагаемого устройства

Устройство работает по следующему принципу. При нажатии на клавишу 4 происходит заряд батареи конденсаторов до значения U_H (см рис. 3.10). 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_H до нуля и возрастание напряжения намагничивающего тока I_H от нуля до максимального значения. При этом напряжение U_H опережает ток нагрузки I_H 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_H через намагничивающую обмотку 10 уменьшается до нуля.

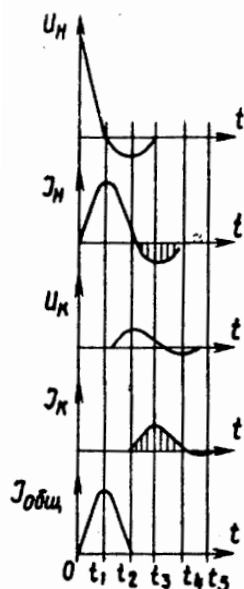


Рисунок 3.10 – Графики электрических параметров устройства

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_H перезаряда конденсаторов от наивысшей величины до нуля. А в про-

межутке 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_H и положительной полуволной компенсирующего тока I_K , из-за чего исключен размагничивающий фактор.

Авторы патента заявляют, что путем ввода компенсирующей обмотки в блок намагничивания и ее шунтирование переменным резистором дает возможность существенно облегчить устройство.

Обратимся к патенту № 1760566А1 «Устройство для намагничивания высококоэрцитивных магнитов электромагнитного привода с магнитопроводом и обмоткой возбуждения.» [13] Целью изобретения этого устройства, по словам авторов, уменьшить потребляемую мощность при намагничивании автоматизации процесса намагничивания. На рисунке 3.11 представлена структурная схема устройства для намагничивания, а на рисунке 3.12 схема размещения намагничиваемого электромагнитного привода в сборе (с магнитопроводом, обмоткой возбуждения и намагничиваемым магнитом) в индукторе.

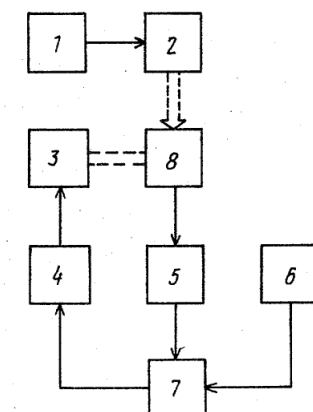


Рисунок 3.11 – Структурная схема устройства

Это устройство состоит из источника тока 1, индуктора 2, электродвигателя 3, программируемого регулятора скорости вращения

электродвигателя 4, амплитудного детектора 5, формирователя опорного напряжения и компаратор 7 [13]. Намагничиваемый электромагнитный привод 8 в сборе с обмоткой размещен в индукторе 2 и кинематически связан с валом электродвигателя 3. Обмотка электромагнитного привода 8, например, магнитоэлектрического тормоза, соединена с амплитудным детектором 5, выход которого соединен с первым входом компаратора напряжения 7, второй вход которого подключен к выходу формирователя 6 опорного напряжения. Вход программируемого регулятора скорости вращения электродвигателя соединен с выходом компаратора 7 напряжения, а выход соединен с обмоткой электродвигателя, имеющего выход для кинематической связи с электромагнитным приводом.

Индуктор, изображенный на рисунке 3.12, сделан в виде двух соосных катушек, диаметр которых приблизительно равен радиусу электромагнитного привода. Расстояние между ними немного больше ширины электромагнитного привода. Обмотки обеих катушек соединены последовательно согласно.

Устройство для намагничивания высококоэрцитивных магнитов электромагнитного привода с магнитопроводом и обмоткой возбуждения функционирует следующим образом.

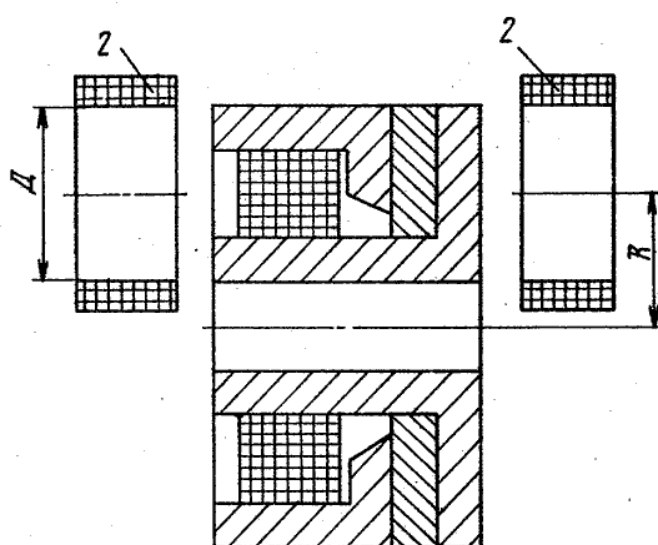


Рисунок 3.12 – Схема размещения электромагнитного привода в индукторе

Включение источника тока 1 и электродвигателя 3 происходит одновременно. Скоростью вращения вала электродвигателя 3 распоряжается программируемый регулятор 4, поддерживающий такую скорость его вращения, чтобы обеспечить полное промагничивание рабочего участка магнитопровода электромагнитного привода 8 при его прохождении в зоне магнитного поля, создаваемого индуктором 2. При этом также поддерживаются условия контроля за величинами мгновенных значений ЭДС в обмотке электромагнитного привода допустимых значений ЭДС пробоя ее изоляции.

Формирователь опорного напряжения 6 формирует напряжение, не превышающее допустимого значения напряжения пробоя изоляции обмотки электромагнитного привода 8. Это напряжение с формирователя 6 идет на второй вход компаратора 7. В процессе намагничивания напряжение с обмотки электромагнитного привода 8 поступает на амплитудный детектор 5 и далее на первый вход компаратора 7, где совершается сравнение реального напряжения на обмотке электромагнитного тормоза 8 с заданным (опорным) напряжением формирователя 6. Если сигнал превышает величину формирователя 6, компаратор 7 вырабатывает сигнал рассогласования, управляющий работой регулятора 4 скорости вращения вала 10 электродвигателя 3. При этом регулятор 4 изменяет скорость вращения электродвигателя 3 с целью обеспечения выполнения условия полного промагничивания и предотвращения возможности пробоя изоляции обмотки электромагнитного привода.

Таким образом обеспечивается выполнение поставленной цели - автоматизации процесса намагничивания и уменьшение потребляемой мощности, а также предотвращение возможности пробоя изоляции обмотки намагничиваемого электромагнитного привода.

Применение такого устройства весьма ограничено и конструкция представляется довольно сложной.

Рассмотрим одно из первых авторских свидетельств по вопросу намагничивания, патент № 698061 «Импульсное намагничивающее устройство» [14]. По мнению авторов, у существующих ранее конструкций таких устройств недостатками является то обстоятельство, что для намагничивания магнита используется только первая полуволна тока. Она при значительной амплитуде имеет малую длительность, из-за чего большая часть намагничивающей силы обмотки демпфируется вихревыми токами в массиве магнита, что приводит к неоднородному намагничиванию магнита по всему объему.

Целью изобретения является повышение эффективности намагничивания постоянных магнитов. По словам авторов, этого можно достичь, если вентильные элементы представляют собой двухполупериодный выпрямительный мост, а намагничивающая обмотка включена в диагональ моста. На рисунке 3.13 представлена электрическая схема намагничивающей установки. Она состоит из блока питания (БП), конденсаторной батареи 1, соединенной через ключ 2 с двухполупериодным выпрямительным мостом на вентильях 3, 4, 5, 6, в диагональ которого встроена намагничивающая обмотка 8 [14].

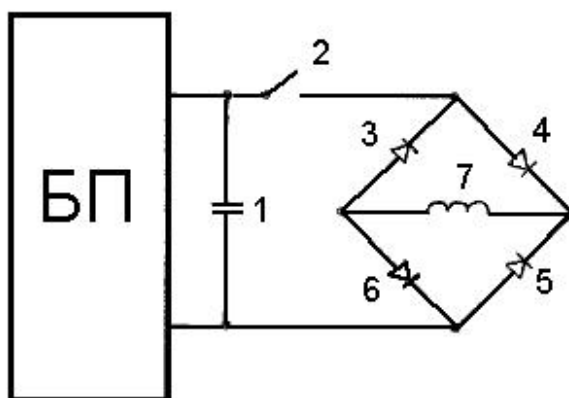


Рисунок 3.13 Электрическая схема устройства

Объясним принцип работы устройства. Блок питания обеспечивает разовый заряд конденсаторной батареи 1. В момент намагничивания ключ 2 замыкается и напряжение батареи 1 поступает к двухполупериодному выпрямительному мосту, в диагональ которого встроена намагничивающая

обмотка 7. Под действием приложенного напряжения по двум плечам моста и обмотке 7 проходит ток и намагничивающая сила обмотки воздействует на постоянный магнит. Как только напряжение на батарее 1 станет равным нулю, ток в обмотке продолжит протекать в том же направлении из-за действия индуктивности по двум путям – через диоды 4, 6 перезаряжая батарею 1, и через диоды 3, 4 и 5, 6, шунтирующие в этот момент обмотку 7. Вслед за частичным перезарядом батареи этот же процесс повторяется через диоды 5, 3 и соответственно диоды 3, 4 и 5, 6.

Таким образом, несмотря на то, что колебательный процесс в цепи разряда не пропадает, ток через обмотку 7 протекает только в одном направлении, что исключает размагничивание постоянного магнита, а длительность импульса тока через обмотку становится максимально возможной при данном значении емкости батареи и данных параметров контура разряда, то есть для получения намагничивающего импульса тока применяются все полуволны колебательного процесса разряда батареи, что повышает степень ее применения в устройстве.

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 3.14 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 началь-

ном 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.

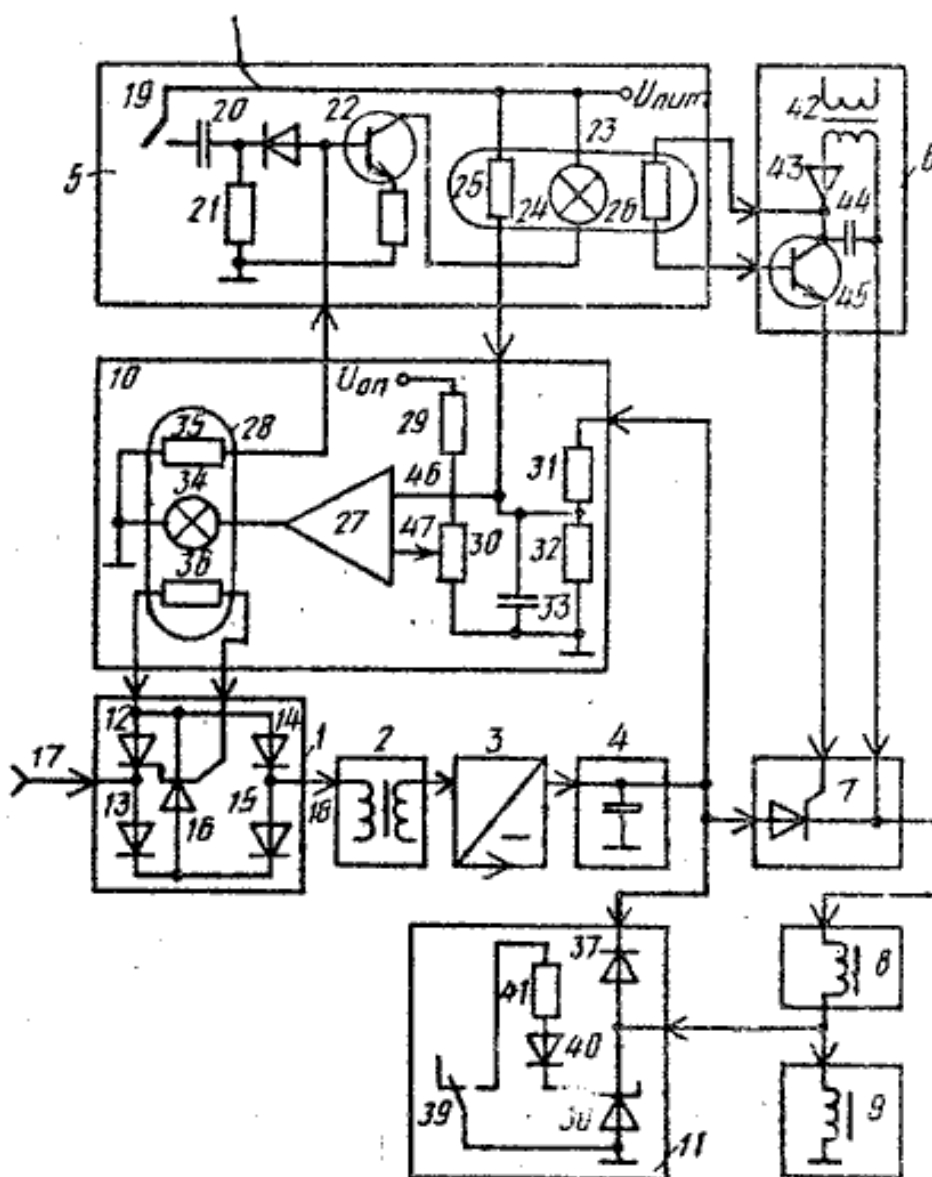


Рисунок 3.14 – Структурная схема устройства

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 3.15 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.

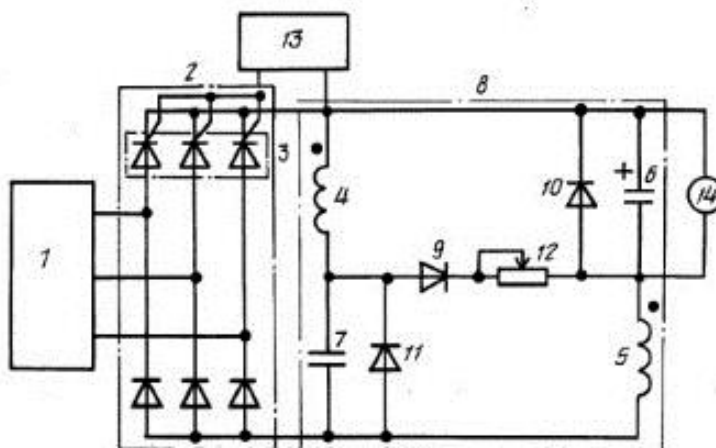


Рисунок 3.15 – Принципиальная схема намагничивающего устройства

Тогда конденсаторы группы 6 и 7 шунтированы 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, что изображено на рисунке 3.9 участком 0-а-б. Аналогично изменению тока в катушках 4 и 5 совершается изменение магнитного потока, который действует на намагничиваемый образец или изделие.

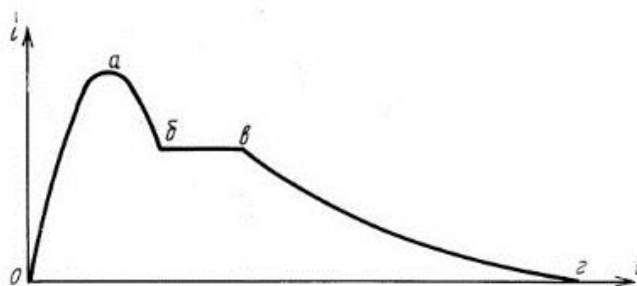


Рисунок 3.16 График изменения тока от времени

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. Промагничивание магнита или изделия соответствует участку б-в (рис. 3.16). После отключения управляющего импульса тиристоры 3 закрываются и группа конденсаторов 6, 7 начинают

разряжаться до нуля. Во время этого процесса магнитный поток спадает, что характеризуется участком в-г (рис. 3.16). 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.

Выводы: 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.

4. РАЗРАБОТКА МАЛОГАБАРИТНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ НАМАГНИЧИВАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ КОНДЕНСАТОРНОГО ТИПА

4.1 Выбор структурной схемы ее построения

Наибольший интерес с точки зрения универсальности и практической реализации, представляют схемы, показанные на рисунке 3.1 и 4.1

Обратимся к рисунку 3.1, на котором представлена структурная схема намагничивающей установки. Эта схема является бестрансформаторной. Энергия от источника поступает в виде импульса сразу же на индуктор. В такой схеме увеличение длительности импульса лучше всего получить путем увеличения индуктивности разрядной цепи, при этом амплитуда импульса снизится не на много. Увеличение емкости может привести к небольшому возрастанию импульса и амплитуды, но выбирать емкость накопителя следует из условия необходимой энергии и возможности получить минимальные массу и габариты, а также стоимость установки [17]. С учетом вышесказанного в бестрансформаторной импульсной установке в качестве индуктора целесообразно использовать электромагнит или многовитковый соленоид. Применение многовитковых индукторов с магнитопроводами из электротехнической стали, питаемых импульсным током от бестрансформаторной установки, особенно эффективны в случае намагничивания цельных роторов из редкоземельных материалов с определенной структурой. Разрабатываемая установка проектируется для намагничивания образцов обычной прямоугольной формы, поэтому данный вариант не подходит.

Рассмотрим импульсную установку с трансформатором, представленную на рисунке 4.1. В такой установке энергия от конденсаторов поступает в индуктор не сразу, а через промежуточный специальный импульсный трансформатор (ИТ).

Наличие ИТ приводит к небольшому снижению КПД установки и увеличению обратного размагничивающего выброса тока в индукторе. Тем не менее ИТ в установке предоставляет ряд очень важных преимуществ:

- 1) Пониженное напряжение на индукторе, обеспечивающее электробезопасность в работе с установкой.
- 2) Возможность получения сложных видов намагничивания, благодаря простым и технологичным в изготовлении одновитковых индукторов.
- 3) Универсальность оборудования, то есть использование одной установки с комплектом легкоъемных одновитковых индукторов.

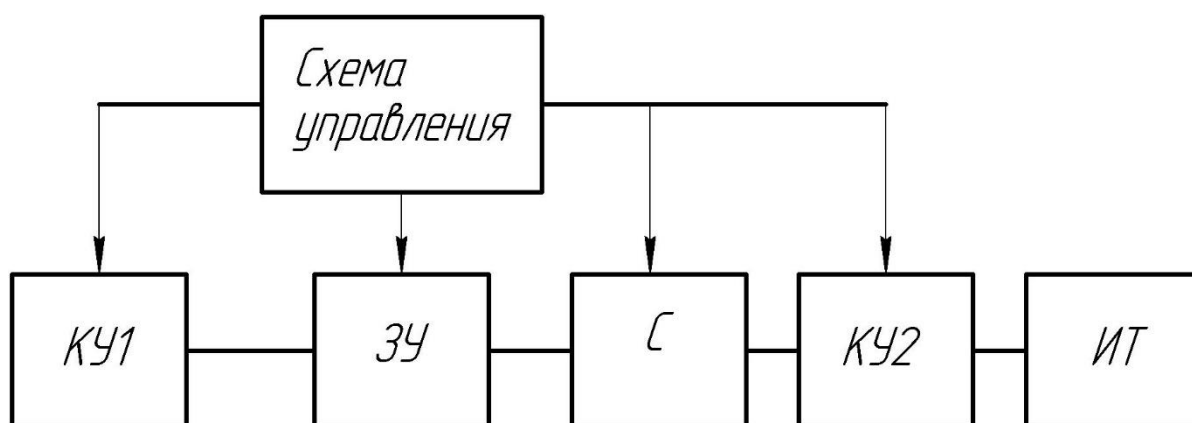


Рисунок 4.1 Структурная схема намагничивающей установки и импульсным трансформатором

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 4.2 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.

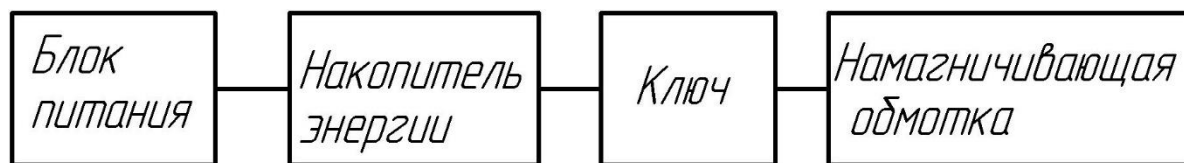


Рисунок 4.2 Структурная схема намагничивающей установки

Для возможности управления установкой с персонального компьютера рассмотрим возможную структурную схему намагничивающей установки, представленной на рисунке 4.3. Оператор может управлять установкой с ПК с помощью блока управления, который воздействует на схему управления. С ПК оператор может установить значение необходимой величины намагничивания для разных образцов, а блок управления следит, с помощью схемы управления, за величиной накопленной энергии в батарее конденсатора и управлением коммутатора (ключа) для намагничивания образца. Важно отметить, что блок управления входит в состав самой установки, и разрабатываемое устройство малогабаритное и переносное. Взаимодействие с ПК осуществляется при помощи USB кабеля. Таким образом к установке возможно подключение любого компьютера, нужно лишь установить на него необходимую программу для управления. Поскольку проектируемая установка является не только намагничивающей, но размагничивающей, то в качестве исполняющего устройства может быть намагничивающая обмотка, так и индуктор для размагничивания (более удобен и эффективнее)

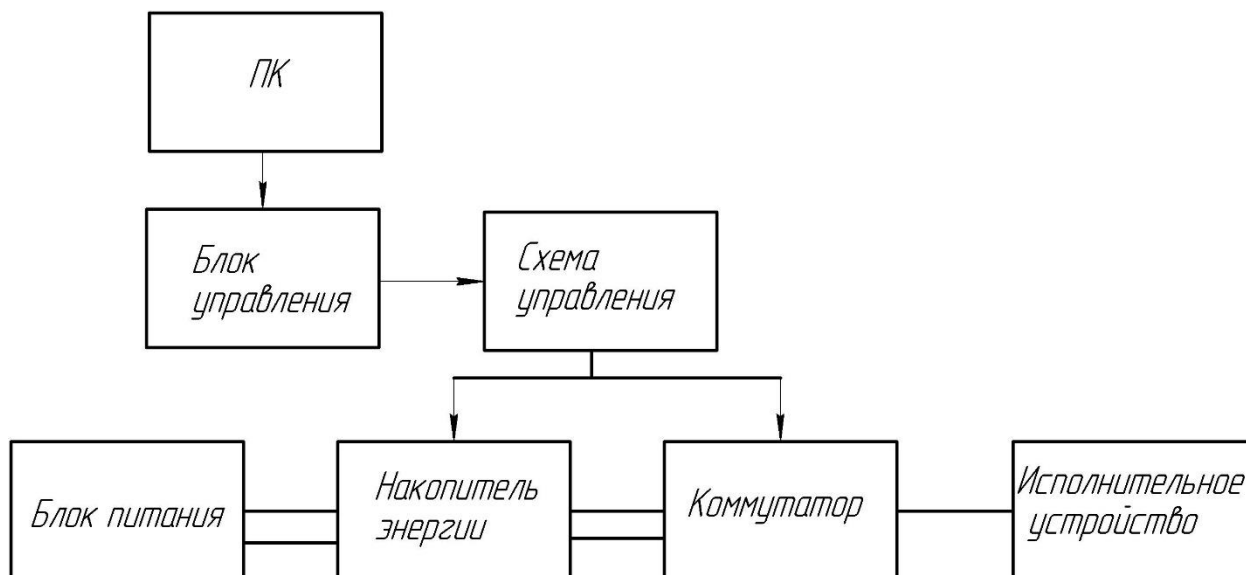


Рисунок 4.3 Структурная схема намагничивающей установки, управляемая с ПК.

4.2 Расчет узлов (элементов) намагничивающей установки

4.2.1 Выбор параметров намагничивающей обмотки

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

$$ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = U_0, \quad (4.1)$$

где $r = r_y + r_n$; $L = L_y + L_n$.

Для периодического режима корни характеристического уравнения выражения (4.1) комплексные, и решение уравнения имеет вид:

$$i = i_m e^{-bt} \sin(\omega_0 t + \pi), \quad (4.2)$$

где

$$I_m = \frac{U_0}{w_0 L};$$

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

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

Первый максимум тока определяется как

$$I_{max} = I_m e^{-\frac{b}{w_0} \theta} \sin \theta, \quad (4.3)$$

$$\text{где } \theta = \arctg \frac{w_0}{b} = \arcsin w_0 \sqrt{LC}.$$

Этому соответствует максимальное значение намагничивающей силы

$$F_{max} = I_m W e^{-\frac{b}{w_0} \theta} \sin \theta, \quad (4.4)$$

где W - число витков намагничивающей катушки.

Преобразуем (4.4) следующим образом:

$$F_{max} = \frac{U_0 W}{\sqrt{\frac{L_y}{c} + \frac{L_H}{c}}} e^{-\frac{\frac{r_y + r_H}{2}}{\sqrt{\frac{L_y}{c} + \frac{L_H}{c} - \frac{(r_y + r_H)^2}{4}}} \theta}. \quad (4.5)$$

Сопротивление r_H можно представить как сумму двух сопротивлений

$$r_H = r_{\Pi} + r_3, \quad (4.6)$$

где r_{Π} – 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 $r_H = r_{\Pi}$, 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:

$$q = \frac{S_{\pi}}{\zeta} W = \frac{\pi d^2}{4\zeta} W, \quad (4.7)$$

где S_{π} – площадь поперечного сечения провода; ζ – коэффициент заполнения. Откуда

$$W = K \frac{1}{d^2}; S_{\pi} = \frac{q\zeta}{W}, \quad (4.8)$$

где

$$K = \frac{4q\zeta}{\pi}. \quad (4.9)$$

Активное сопротивление r_{π} можно определить как

$$r_{\pi} = r_n = \rho \frac{l}{S_{\pi}}. \quad (4.10)$$

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

Длину провода представим как

$$l = k_l W, \quad (4.11)$$

где k_l – средняя длина витка обмотки.

Подставляя (4.8) и (4.11) в (4.10), получим

$$r_{\pi} = K_{\zeta} W^2, \quad (4.12)$$

где $K_{\zeta} = \frac{\rho k_l}{q\zeta}$.

Индуктивность L пропорциональна квадрату числа витков, т.е.

$$L_{\pi} = K_L W^2, \quad (4.13)$$

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

Подставляя (4.12) и (4.13) в (4.5), получим

$$F_{max} = \frac{U_0 W}{\sqrt{K_1 + K_2 W^2}} e^{-\frac{K_3 + K_4 W^2}{\sqrt{K_5 + K_6 W^2 + K_7 W^4}} \theta}, \quad (4.14)$$

где $K_1 = \frac{L_y}{c}$; $K_2 = \frac{K_L}{c}$; $K_3 = \frac{r_y}{2}$; $K_4 = \frac{L_y}{c}$; $K_5 = K_1 - K_3^2$; $K_6 = K_2 - 2K_3K_4$; $K_7 = -K_4^2$.

Таким же образом можно получить выражения для θ :

$$\theta = \arctg \frac{\sqrt{K_5 + K_6 W^2 + K_7 W^4}}{K_3 + K_4 W^2} = \arcsin \frac{\sqrt{K_5 + K_6 W^2 + K_7 W^4}}{\sqrt{K_1 + K_2 W^2}}. \quad (4.15)$$

Из (4.15) видно, что намагничивающая сила F_{max} для данной импульсной намагничивающей установки и намагничиваемой магнитной системы зависит только от числа витков. Функция $F_{max} = f(W)$ имеет максимум, который можно найти, рассчитав F_{max} для ряда значений W .

Определив число витков, при котором F_{max} максимальна, можно определить из уравнения (4.8) оптимальной диаметр провода

$$d = \sqrt{\frac{K}{W}} = \sqrt{\frac{4q\zeta}{\pi W}}. \quad (4.16)$$

Далее, чтобы нам получить эффективное использование намагничивающей установки, а в это входит получение максимальной намагничивающей силы, обеспечение требуемой длительности импульса, требуется согласование их параметров с параметрами намагничивающей катушки. При этом важно знать электрические параметры установки: Емкость C , индуктивность L_y и эквивалентное активное сопротивление разрядной цепи r_y .

Определение этих параметров расчетным путем возможно лишь при проектировании новых устройств. Но даже в этом случае возникают трудности, например, очень сложно рассчитать эквивалентное сопротивление игнитрона при его работе в импульсном режиме, индуктивность монтажа, эквивалентное сопротивление конденсаторной батареи и др. Это можно сделать опытным методом.

4.2.2 Расчет емкостного накопителя

Эквивалентная схема установки представлена на рисунке 4.4. На рисунке 4.4 С – конденсаторная батарея, заряженная до номинального напряжения, к – ключ, (вентиль), с помощью которого емкость разряжается на намагничивающую катушку L, активное сопротивление которой мало.

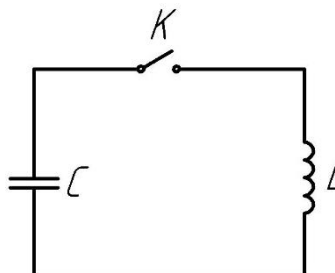


Рисунок 4.4 Эквивалентная схема намагничивающей установки

Наиболее удобным и экономичным накопителем является конденсаторная батарея. Современный уровень техники позволил использовать малогабаритные конденсаторы с большой емкостью для создания конденсаторных батарей, которые в установках такого рода определяют основные габариты [19].

Известно, что амплитуда первого импульса тока в схеме, представленной на рисунке 4.4, определяется выражением

$$I_m = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (4.17)$$

Из выражения 4.17 имеем:

$$C = L \frac{I_m^2}{U_0^2}, \quad (4.18)$$

где U_0 – напряжение, до которого заряжена конденсаторная батарея. I_m – Амплитуда первого импульса тока. L – Индуктивность цепи разряда.

Для определения емкости конденсаторной батареи рассчитаем индуктивность цепи разряда L. Величина индуктивности в основном определяется геометрическими размерами соединительных шин. Из конструктивных чертежей видно, что соединение отдельных элементов цепи сделано шинами

толщиной 3 мм и длиной порядка 25 мм. Общая длина разрядной цепи составляет порядка 700 мм.

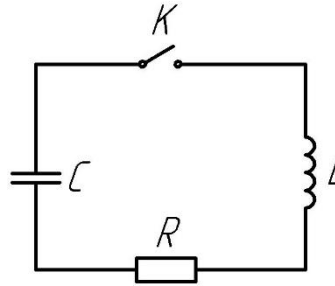


Рисунок 4.5 Эквивалентная реальная схема намагничивающей установки

Индуктивность прямолинейного провода произвольного сечения при постоянном токе низкой частоты определяется как

$$L = \frac{\mu_0 \cdot l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{g} - 1 \right), \quad (4.19)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость воздуха, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

l – длина провода, м;

g – среднее геометрическое расстояния площади его поперечного сечения от самой себя, м.

Для прямоугольного сечения со сторонами b и c , величина g определяется с достаточной степенью точности как

$$g = k(b+c), \quad (4.20)$$

где $k=0.2236$;

$b+c=25$ мм .

Тогда $g=0.2236 \cdot 25 \cdot 10^{-3} = 0.0056$ (м).

Общая индуктивность соединительных шин

$$L_{\text{ш}} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.7}{2\pi} \left(\ln \frac{2 \cdot 0.7}{0.0056} - 1 \right) = 0.63 \text{ мкГн}$$

Индуктивность игнитрона рассчитывалась из предположения, что это провод с диаметром, равным диаметру провода выводу анода.

Из паспортных данных игнитрона расстояние между катодом и анодом и длина вывода составляет порядка 500 мм, а диаметр вывода 15 мм.

Индуктивность прямолинейного провода круглого сечения определяется формулой

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r} - \frac{3}{4} \right) \quad (4.21)$$

Подставляя известные величины в (3.48) получим

$$L_{\text{игн}} = 0.41 \text{ мкГн}$$

Суммарная индуктивность игнитрона и соединительных шин составляет

$$L_{\text{игн}} + L_{\text{ш}} = 0.41 + 0.63 = 1.04 \text{ мкГн}$$

Расчет индуктивности конденсаторной батареи связан с определенными трудностями из-за сложной конфигурации батареи. Кроме того, допущение, что шина прямолинейна значительно снизило величину индуктивности. Учитывая все эти высказывания, примем индуктивность цепи разряда для расчета конденсаторной батареи равной 2 мкГн.

Зададимся величиной начального напряжения $U_0=250$ В. Амплитуда первого импульса тока задана техническим заданием 20000 А. Подставив эти величины в (4.18), получим

$$C = 2 \frac{4 \cdot 10^8}{625 \cdot 10^2} = 12800 \text{ мкФ.}$$

Для получения такой емкости при заданном напряжении используются конденсаторы типа ЭФ. Эти конденсаторы предназначены для работы в устройствах импульсного освещения. Их паспортные данные: рабочее напряжение 300 В, емкость 1300 мкФ. Для получения рассчитанной емкости конденсаторной батареи собирается блок из десяти конденсаторов типа ЭФ $300,0 \times 300$ в.

Полупериод времени разряда определяется как

$$\tau = \pi \sqrt{L \cdot C} \quad (4.22)$$

$$\tau = 3.14 \cdot \sqrt{2 \cdot 13000} = 500 \text{ мкс.}$$

4.2.3 Выбор ключа

Для управления энергией накопителя в качестве ключа обычно используются бесконтактные элементы. Довольно долгое время для управления значительными по величине токами используют ртутные вентили самых различных конструкций.

Поставленной задаче удовлетворяют запаянные стеклянно металлические игнитроны. Эти игнитроны работают в схемах контактной электросварки и рассчитаны при длительной нагрузке на средний ток 100 – 200 А.

В функции игнитрона входят:

1. Включить цепь разряда;
2. Предотвратить появление обратной полуволны при колебательном характере разряда.

Этим обеспечивается получение однополярного импульса для намагничивания систем с постоянными магнитами.

Тем не менее игнитроны морально устарели. Основным недостатком игнитронов является ограниченный срок службы зажигающего элемента. Он нагревается при работе, его поверхность с течением времени загрязняется и на ней образуются пятна ртути, что в конечном счете приводит к пропускам в зажигании дуги и к увеличенному потреблению тока. К недостаткам игнитронов относится также необходимость искусственного охлаждения, что значительно усложняет их конструкцию, но в нашей установке этого не требуется.

Еще одним минусом является нестабильность пусковой характеристики и значительный предразрядный ток.

Выбрасывать данные приборы строго запрещено, только сдавать на утилизацию.

Игнитрон наполнен ртутью, которая при его работе сильно нагревается. При разрушении корпуса игнитрона велик риск загрязнения окружающей среды и отравления людей и животных.

В настоящее время мощные полупроводниковые управляемые диоды – тиристоры, у которых принцип управления такой же, как у игнитронов, мощность управления и потерь несоизмеримы - начинают успешно заменять иг-

нитроны. Несмотря на перечисленные выше недостатки установки с игнитронами в качестве вентиля до настоящего времени существуют и функционируют. Можно сказать, что еще рано списывать данные устройства. Поэтому произведем расчет игнитрона в установке.

Расчет игнитрона производили из условия пропускания среднего значения тока при синусоидальной форме, так как в справочниках не дается максимальная величина импульсного тока

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_m \tau}{\pi T} \quad (4.23)$$

где I_m – амплитуда тока;

τ – длительность импульса;

T – время усреднения – минимальное время, в течение которого можно повторить разряд.

Имеем $I_m = 20000 \text{ A}$

$\tau = 500 \text{ мкс}$;

$T \geq 5 \text{ с}$.

Из формулы (3.50)

$$I_{\text{ср}} = \frac{20000 \cdot 500 \cdot 10^{-6}}{3.14 \cdot 5} = 0.635 \text{ A}$$

В качестве ключа выбран игнитрон типа И1 – 140/0.8. Он имеет следующие паспортные данные:

Средний ток – 140 A;

Наибольшая амплитуда прямого и обратного напряжения – 800 В;

Падение напряжения между анодом и катодом: максимальное – 30 В, минимальное – 12В;

Максимальная амплитуда тока в цепи поджигания – 100 A;

Наибольший средний ток в цепи поджигания – 1 A;

Время усреднения – 5 с;

Наибольшее отрицательное напряжение между поджигателем и катодом – 5 В.

В подобного рода игнитронах применяется водяное охлаждение, но так как, полученное значение среднего тока значительно меньше паспортных, то игнитрон можно эксплуатировать в режиме естественного охлаждения. Поджигание игнитрона осуществляется с помощью конденсатора. Заряженный конденсатор через разрядную цепь подается на игнитрон (см рис 4.6). Диод VD служит для предотвращения обратного напряжения между поджигателем П и катодом К.

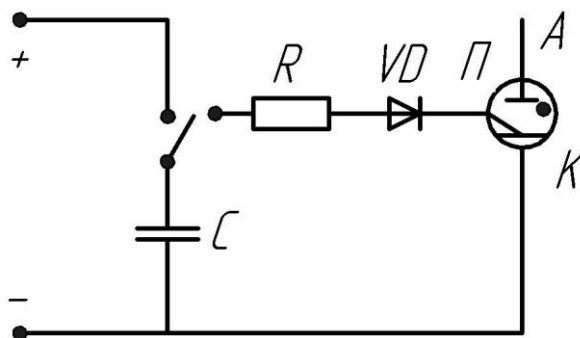


Рисунок 4.6 Схема поджига игнитрона

Величина сопротивления R подбирается опытным путем в зависимости от начального напряжения, емкости конденсатора и паспортных данных игнитрона.

Аналогичным образом отпирается тиристор, в случае его использования, на рисунке 4.7.

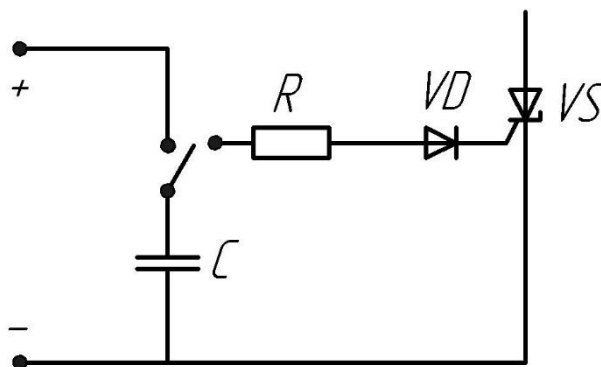


Рисунок 4.7 Схема включения тиристора

В данной схеме и следующих будем использовать быстродействующий импульсный тиристор типа ТБИ253-1000-22, который обладает низкими динамическими потерями, малым зарядом обратного восстановления и разветв-

ленным управляющим электродом для высоких скоростей нарастания тока. Ниже приведем его характеристики.

Средний прямой ток – 1000А;

Повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии - 2000÷2200 В;

Повторяющееся импульсное обратное напряжение - 2000÷2200 В;

Максимальный прямой ток управления – 8А;

Максимальное обратное напряжение управления – 5 В;

Пороговое напряжение, макс – 1.20 В;

Время задержки включения – 2.5 мкс;

Время выключения – 20÷ 40 мкс.

Сравнивая характеристики игнитрона и тиристора, преимущества тиристора очевидны, однако для нормального функционирования проектируемой установки использование игнитрона достаточно, учитывая дороговизну тиристора. С другой стороны, применение тиристора дает возможность работать установке с более высокими токами, что в итоге приведет к повышению величины напряженности поля.

4.2.4 Выбор схемы управления

Схема управления в намагничивающей установке выполняет ряд задач. Первая задача — это произвести накопление энергии, вторая – производство однополярного импульса.

Эти задачи выполняет коммутирующее реле P_1 (см рис 4.8). Если обмотка реле P_1 находится под током, то осуществляется заряд конденсаторной батареи C_3 и поджигающей емкости C_2 . При снятии напряжения с обмотки реле P_1 конденсаторная батарея отключается от зарядной цепи и разряжается через игнитрон или тиристор (см рис. 4.9), который поджигается через перекидной контакт реле P_1 от емкости C_2 .

Кроме реле P_1 в схеме предусмотрена максимальное реле P_2 , которое выполняет вспомогательные задачи, ускоряя заряд конденсаторной батареи при достижении 200 В. Кроме того, при шунтировании ограничительного со-

противления 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_{19} , которого включается на конденсаторную батарею тумблером T_2 .

Величина этого сопротивления 47 Ом, мощность рассеивания его равна 25 Вт. Такая большая мощность рассеивания выбрана для того случая, когда необходимо всю накопительную энергию направить мимо намагничивающей обмотки.

В некоторых случаях имеется необходимость не фиксировать напряжение на конденсаторной батарее. Для этого, чтобы облегчить работу оператора, вводится замедление нарастания напряжения на конденсаторе. С помощью тумблера зарядную цепь конденсаторной батареи включается дополнительное сопротивление R_{16} .

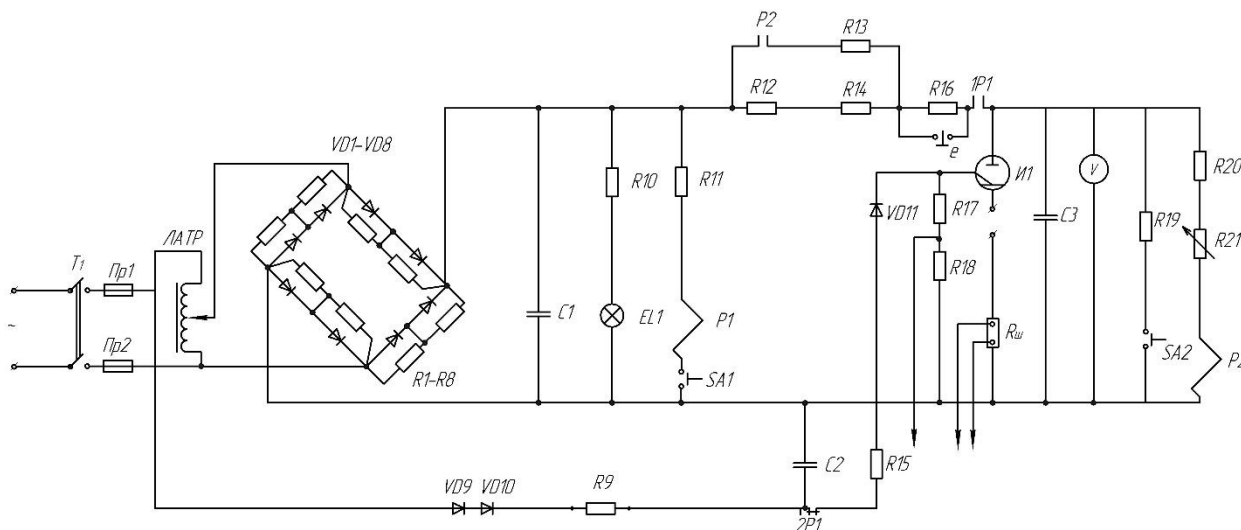


Рисунок 4.8 Принципиальная схема намагничивающей установки с игнитроном

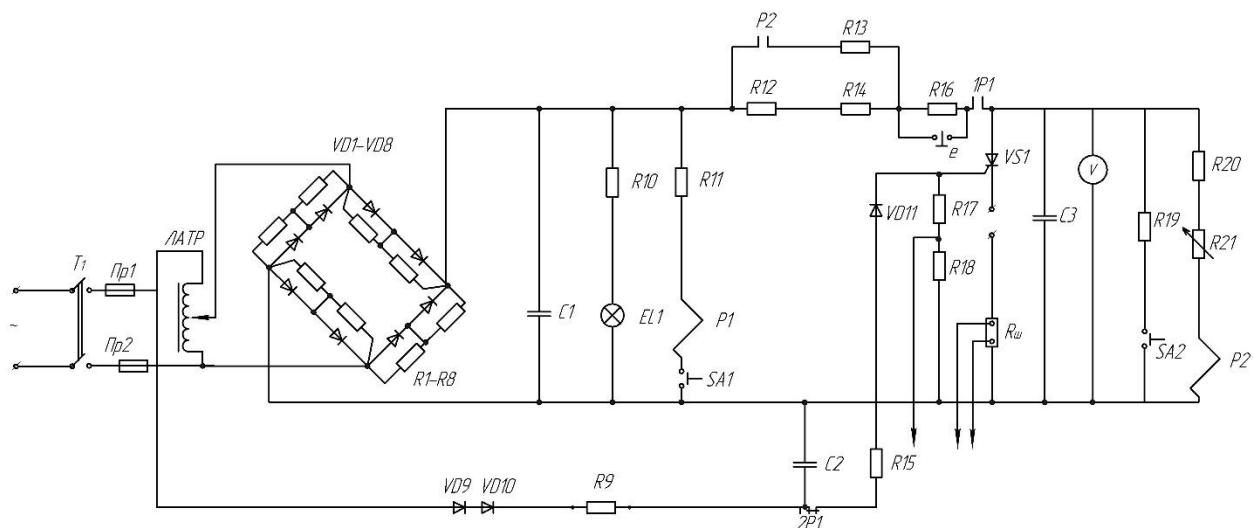


Рисунок 4.9 Принципиальная схема намагничивающей установки с тиристором

4.2.5 Блок питания установки

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 4.10. Из него видно, что цепи заряда и поджига игнитрона разделены. Это сделано по той причине, что в режиме размагничивания может понадобиться такое напряжение, которое будет недостаточно для поджига игнитрона.

На рисунке 4.10 обозначено:

C_6 – конденсаторная батарея;

$C_{п}$ – конденсатор поджига игнитрона;

$R_1 R_2$ – ограничивающие сопротивления;

$D_1 \div D_5$ – выпрямители.

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

$$T = (3 \div 4) \tau_3 = (3 \div 4) R_1 C_6$$

Отсюда

$$R_1 \leq \frac{T}{(3 \div 4)C_6} = \frac{10}{(3 \div 4) \cdot 13 \cdot 10^{-3}} = (256 - 196) \text{ Ом.}$$

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

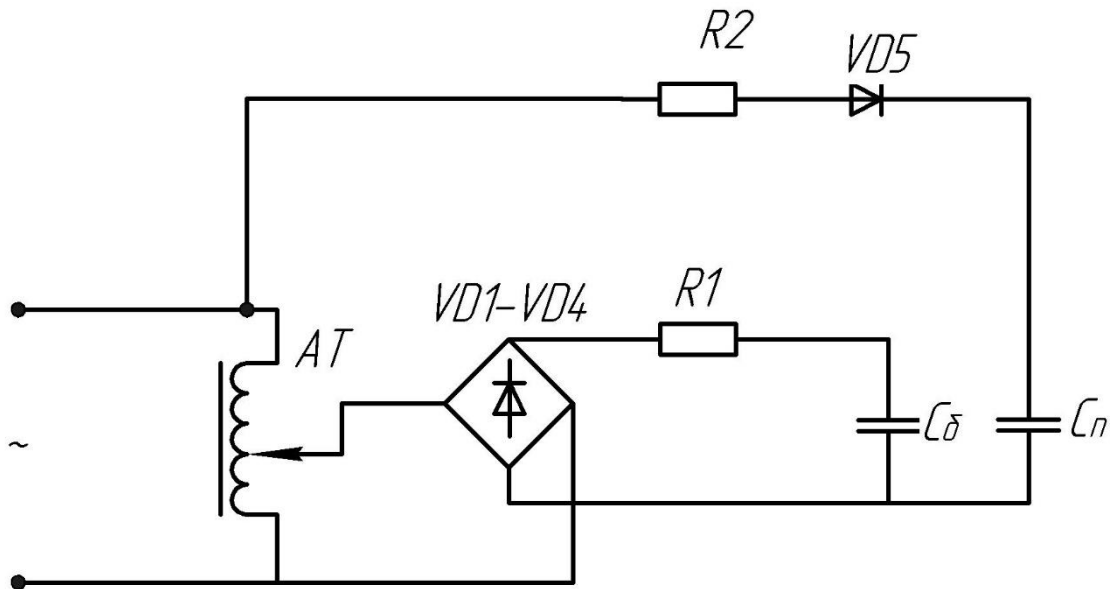


Рисунок 4.10 Принципиальная схема питания установки

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 восьми диодах типа Д 302, имеющих следующие данные: средний выпрямительный ток 10А, максимальная амплитуда обратного напряжения 200В.

Величины зарядной цепи конденсатора поджега рассчитываются аналогично, только учитывается, что время заряда этой емкости должно быть значительно меньше чем время заряда конденсаторной батареи, поскольку в режиме размагничивания будет производиться неполный заряд конденсаторной батареи. Величина сопротивления $R_2=100$ Ом, мощность 25 Вт.

4.3 Экспериментальные исследования

4.3.1 Измерение амплитуды одиночного импульса

Для контроля параметров вырабатываемого импульса: амплитуды, длительности, времени нарастания используется шунт, величина которого лежит в пределах $0.001 - 0.0001$ Ом. Падение напряжения на шунте подается на вход электронного осциллографа, а импульс синхронизации снимается с делителя напряжения $R_{17}R_{18}$.

При измерении амплитуды импульсов применение обычных шунтов невозможно, поскольку наличие у них большой величины индуктивности приводит к значительным погрешностям. Поэтому прибегают в таких случаях к «безреактивным» шунтам. Для измерения и наблюдения параметров импульса был изготовлен безреактивный шунт, имеющий две параллельные пластины. В дополнение к нему между пластинами крепится третья, медная пластина, один конец которой закрепляется в колодке шунта, другой конец – свободный, он является потенциальным (см. рис 4.11).

Измеряемый ток протекает по манганиновым пластинам, возбуждая вокруг себя магнитное поле, которое определяет индуктивность пластин и, следовательно, индуктивное падение напряжения.

Поскольку в середине пластины 1 поле отсутствует, то и крайняя, и средняя пластины оказываются охваченными общим магнитным потоком. В итоге в них наводятся одинаковые ЭДС. Шунт подключается в измерительную цепь зажимами а, в, следовательно, наводимые напряжения включаются встречно. Таким образом, влияние индуктивности почти полностью устраняется и обеспечивается измерение только активной составляющей падения напряжения. Последняя пропорциональна измеряемому току. Сопротивление шунта постоянному току равно $0,0005$ Ом.

Для определения точности шунта был изготовлен аналогичный шунт, но с медными пластинами вместо манганиновых. Активное сопротивление такого шунта $R_{ш}=0.000019$ Ом. Далее оба шунта включаются последовательно в разрядную цепь и при одинаковых условиях осциллографом были измерены амплитудные значения импульсов на шунтах: на медном шунте $U_{ав медь}=1$ В, $U_{вб медь}=9.5$ В. На манганиновом шунте $U_{ав манг}=12$ В.

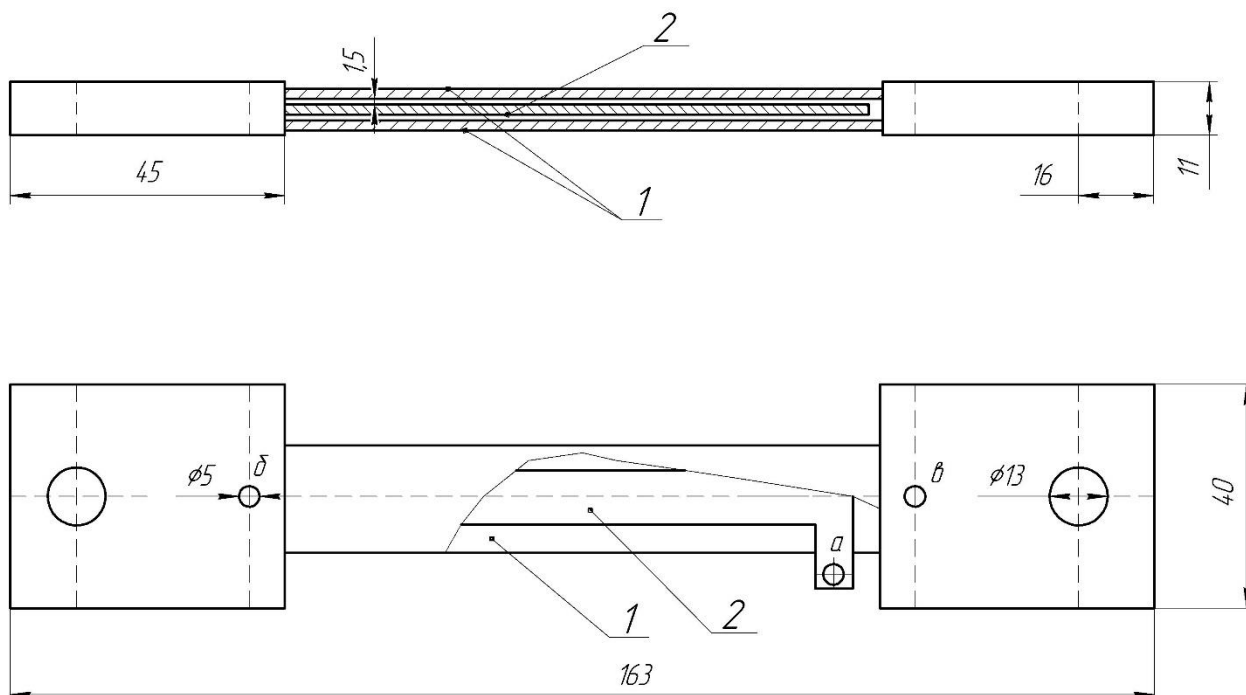


Рисунок 4.11 Безреактивный шунт

$U_{\text{ав медь}}$ и $U_{\text{вб медь}}$ представляют собой индуктивные падения напряжения медного шунта в разных точках. Из экспериментальных данных видно, что введение средней пластины в шунт уменьшает реактивное падение напряжения приблизительно в 10 раз.

Считая индуктивное падение напряжения манганинового шунта равным 1В, можно рассчитать активную составляющую

$$U_{\Gamma} = \sqrt{U_{\text{ав манг}}^2 - U_{\text{ав ш}}^2} = \sqrt{144 - 1} = 11.985 \text{ В}$$

Погрешность из-за наличия индуктивности будет равна:

$$\gamma = \frac{12 - 11.985}{12} \cdot 100\% = 0.35\%$$

Активное сопротивление шунта измерено с точностью 0.5%. Таким образом погрешность сопротивления шунта можно принять равной 0.85%. С учетом поверхностного эффекта и нагрева при прохождении импульса класс точности шунта можно принять равным 1.0.

Наибольшая погрешность от наличия индуктивности шунта получается при максимальной скорости нарастания тока, что соответствует короткому

замыканию внешней цепи $R_{\text{вн}} = 0$. Приведенные выше данные получены при $R_{\text{вн}} = 0.00015 \text{ Ом}$.

4.3.2 Опытный метод определения параметров импульсной установки

Предлагается опытный метод определения параметров импульсной установки. Метод состоит в измерении амплитуды I_k и длительности импульса τ_k при коротком замыкании, длительности импульса τ_n и известной нагрузке, затем полученным опытом данным рассчитывают C , L_y , r_y [20].

Во время работы установки, включая и режим короткого замыкания, разряд конденсатора имеет периодический характер. Длительность полуволны импульса тока в цепи с параметрами r, L, C определяется следующим выражением:

$$\tau = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{4L^2}}}. \quad (4.24)$$

Обычно $\frac{1}{LC} \gg \frac{r^2}{4L^2}$, тогда $\tau = \pi\sqrt{LC}$.

Для режима короткого замыкания

$$\tau_k = \pi\sqrt{L_y C}. \quad (4.25)$$

При наличии нагрузки:

$$\tau_n = \pi\sqrt{(L_y + L_n)C} \quad (4.26)$$

Разделив (4.26) на (4.25), получим

$$\frac{L_n}{L_k} = \sqrt{\frac{L_y + L_n}{L_y}}. \quad (4.27)$$

Откуда

$$L_y = L_n \frac{\tau_k^2}{\tau_n^2 - \tau_k^2}. \quad (4.28)$$

Из выражений (4.25) и (4.28) определим емкость конденсаторной батареи.

$$C = \frac{\tau_k^2}{\pi^2 L_y} = \frac{\tau_H^2 - \tau_k^2}{\pi^2 L_H} \quad (4.29)$$

Амплитудное значение тока короткого замыкания при напряжении заряда U_0 можно представить уравнением

$$I_k = \frac{U_0}{\sqrt{\frac{L_y}{C}}} e^{-\frac{\frac{r_y}{2} \arcsin \sqrt{\frac{L_y}{C} \frac{r_y^2}{4}}}{\sqrt{\frac{L_y}{C}}}} \quad (4.30)$$

или

$$I_k = \frac{U_0}{\sqrt{K_1}} e^{-\frac{K_2 \arcsin \sqrt{\frac{K_1 - K_2^2}{K_1}}}{\sqrt{K_1 - K_2^2}}} \quad (4.30)$$

где $K_1 = \frac{L_y}{C}$; $K_2 = \frac{r_y}{2}$;

Логарифмуя (4.30), получим

$$\frac{K_2}{\sqrt{K_1 - K_2^2}} \arcsin \frac{\sqrt{K_1 - K_2^2}}{\sqrt{K_1}} = -\ln \left(K_1 \cdot \frac{I_k}{U_0} \right). \quad (4.31)$$

Разлагая круговую функцию в ряд и ограничиваясь первыми двумя членами, представим (4.31) следующим образом:

$$K_2^3 - 7K_1K_2 - 6\sqrt{K_1^3} \ln \left(\sqrt{K_1} \cdot \frac{I_k}{U_0} \right) = 0 \quad (4.32)$$

Подставляя в последнее уравнение значения K_1 и K_2 , получим

$$r_y^3 - 28 \frac{L_y}{C} r_y - 48 \sqrt{\left(\frac{L_y}{C} \right)^3} \ln \left(\sqrt{\frac{L_y}{C}} \cdot \frac{I_k}{U_0} \right) = 0 \quad (4.33)$$

Решение (4.33) имеет вид

$$r_{y1} = 2 \sqrt{\frac{28}{3} \cdot \frac{L_y}{C}} \cos \frac{\alpha}{3} \quad (4.34)$$

$$r_{y2,3} = 2 \sqrt{\frac{28}{3} \cdot \frac{L_y}{C}} \cos \left(\frac{\alpha}{3} \pm \frac{2\pi}{3} \right), \quad (4.35)$$

где

$$\cos \alpha = \frac{24 \ln \left(\sqrt{\frac{L_y}{C}} \cdot \frac{I_k}{U_0} \right)}{\sqrt{\left(\frac{28}{3} \right)^3}}.$$

Если ограничиться только первым членом ряда круговой функции, то решение для r_y будет

$$r_y = -2 \sqrt{\frac{L_y}{C}} \ln \left(\sqrt{\frac{L_y}{C}} \cdot \frac{I_k}{U_0} \right). \quad (4.36)$$

Аргумент круговой функции обычно принимает значения от 0.6 до 0.9. Следовательно, точность расчета r_y можно повысить, учитывая, что величина первого члена ряда круговой функции составляет примерно 90% от величины той же функции. Тогда

$$r_y = -1.8 \sqrt{\frac{L_y}{C}} \ln \left(\sqrt{\frac{L_y}{C}} \cdot \frac{I_k}{U_0} \right). \quad (4.37)$$

Для инженерных расчетов точность определения r_y по уравнению (4.37) вполне достаточна. С помощью полученных уравнений (4.28), (4.29), (4.34) или (4.35) можно рассчитать параметры L_y , C и r_y , зная длительность τ_k и амплитуду I_k импульса тока короткого замыкания, а также длительность τ_n импульса при известной нагрузке L_n . Амплитуда и длительность импульса измеряется различными способами, например, посредством осциллографа и безреактивного резистора, включенного в цепь разряда [20].

Индуктивность L_n рассчитывается или измеряется. L_n можно реализовать в виде катушки с ферромагнитным сердечником. При этом

параметры надо выбирать так, чтобы импульс тока не намагничивая сердечник до насыщения, поскольку это связано с резким изменением L_H и большими погрешностями измерений.

Выводы: Полностью теоретически рассчитать все параметры установки не удастся, при проектировании устройства предлагается воспользоваться экспериментальным методом.

5. РАЗРАБОТКА РАЗМАГНИЧИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ НАМАГНИЧИВАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ КОНДЕНСАТОРНОГО ТИПА

5.1 Причины возникновения неустойчивости свойств постоянных магнитов

Магнитный поток, создаваемый постоянным магнитом, меняется с течением времени и при воздействии внешних условий: магнитных полей, механических нагрузок, температуры, радиации, изменений магнитного сопротивления, влияния соседних ферромагнитных масс.

Различают структурную и магнитную неустойчивость. Структурная неустойчивость связана с кристаллическим строением, фазовыми превращениями, уменьшением внутренних напряжений и подобными причинами. Магнитные свойства, изменившиеся в результате структурной неустойчивости (структурное старение), могут быть восстановлены только регенерацией структуры, например, путем повторной термической обработки материала [21].

Причиной магнитной неустойчивости является изменение магнитной (доменной) структуры вещества, стремящейся к установлению устойчивого термодинамического равновесия, как во времени (магнитное старение), так и при изменении внешних условий. Магнитная неустойчивость может иметь обратимый и необратимый характер. Если после возвращения внешних условий к исходным магнитные свойства восстанавливаются, то имеют место обратимые изменения, при наличии гистерезиса—необратимые. Необратимые

изменения, вызванные магнитной нестабильностью, можно устранить повторным намагничиванием материала.

Магнитное старение происходит по закону, близкому к логарифмическому. Количественно оно зависит от формы кривой размагничивания, относительных размеров магнита (положения рабочей точки) и внешних условий, в которых находится материал: температуры, механических напряжений и т. п.

Изменение магнитной индукции $\beta_B = \frac{\Delta B}{B} \cdot 100\%$, вызванное магнитным старением, в рабочей точке с координатами B , H можно приближенно оценить следующим выражением:

$$\beta_B = \frac{a}{H} \left(\frac{tg\delta}{\mu + tg\delta} - \frac{\mu_{\Delta}}{\mu + \mu_{\Delta}} \right) lg\tau \cdot 100\% \quad (5.1)$$

где a – коэффициент, имеющий размерность напряженности поля и определяемый экспериментально по магнитному старению материала в одной рабочей точке. Этот коэффициент зависит от свойств материала в одной и от условий, в которых работает магнит. При температуре $t=20\pm 5^{\circ}\text{C}$ и отсутствии внешних полей для изотропных железоникельалюминиевых магнитов $a=1.4$ кА/м, для анизотропных $a=0.7$ кА/м; $tg\delta = dB/dH$ – тангенс угла наклона касательной в рабочей точке к оси H ; $\mu = B/\mu_0 H$ в рабочей точке; μ_{Δ} – коэффициент возврата; τ – время после намагничивания в днях [22].

Магнитное старение постоянных магнитов в зависимости от марки материала и положения рабочей точки меняется от десятых долей процента до нескольких процентов за один год.

На рисунке 5.1 приведены зависимости, характеризующие временное старение некоторых магнитотвердых материалов при разном положении рабочей точки (разном отношении B/H) [16].

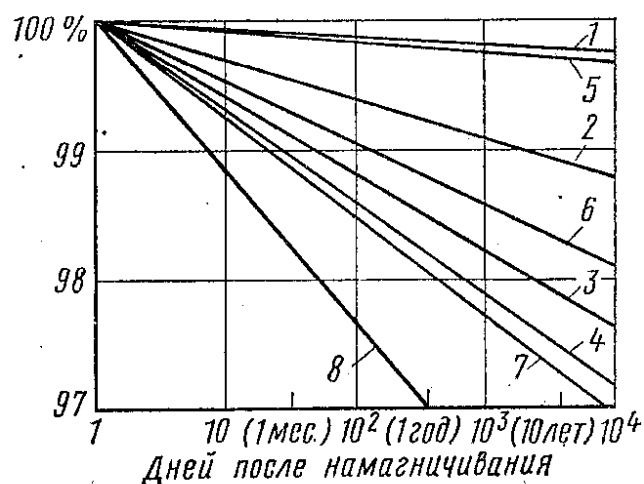


Рисунок 5.1 – Естественное магнитное старение магнитов из некоторых сплавов при комнатной температуре

Таблица 5.1

№ кривой	Материал	Отношение В/Н в рабочей точке магнита, 10^6 Гн/м
1	ЮНДК24	48
2		28
3		15
4		6
5	ЮНДК25А	25
6		11,5
7	ЮНД4	21
8		11

Кривые хорошо иллюстрируют логарифмический характер этих зависимостей (для оси Н взят логарифмический масштаб).

Обратимся далее к рассмотрению магнитной нестабильности, вызванной изменением условий эксплуатации магнита. Наиболее наглядно это

можно показать, рассматривая действие возмущающего поля $\pm\Delta H$ на систему, характеризующуюся рабочей точкой А, которой соответствует магнитная индукция B_A (рис 5.2). При действии поля $+\Delta H$ изменение магнитного состояния произойдет по прямой возврата АС и магнитная индукция станет равной B_C . После устранения поля магнитное состояние практически изменится по прямой СА и индукция возвратится к исходному значению B_A , то есть произойдет обратимое изменение магнитных свойств. При действии поля ΔH рабочей станет точка F. После устранения поля магнитное состояние, изменяясь по прямой возврата EF, определяется точкой F и индукции B_F , то есть происходит необратимое изменение свойств.

Уменьшение магнитной нестабильности идет по пути устранения необратимых изменений, включая магнитное старение (магнитная стабилизация), и последующей оценки оставшихся обратимых изменений.

Основными методами магнитной стабилизации являются частичное размагничивание магнита и обработка его температурными циклами. Идея метода частичного размагничивания заключается в том, что намагниченный магнит подвергают действию переменного магнитного поля с убывающей до нуля амплитудой. В результате такой обработки дальнейшее изменения свойств магнита в известном диапазоне изменений внешних условий становятся обратимыми.

Для объяснения этого явления вновь обратимся к рисунку 5.2. Из него видно, что при действии на магнит убывающего переменного поля с начальной амплитудой $\pm H$ магнитное состояние из точки А перейдет на прямую возврата ЕК и после снятия поля будет характеризоваться точкой F. Если теперь на магнит будут действовать возмущающие поля, не превышающие по величине

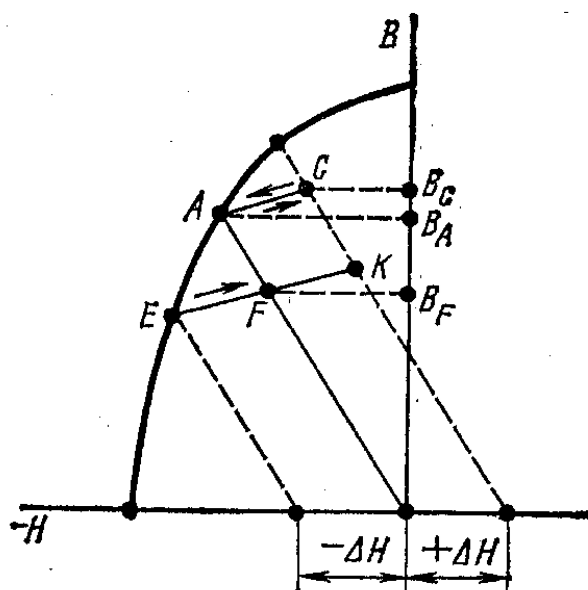


Рисунок 5.2 – Схематическое изображение действия внешнего магнитного поля на постоянный магнит

ΔH , то они вызовут только обратимые изменения. Такого рода стабилизация вызывает уменьшение магнитной индукции в зазоре от B_A до B_F , то есть магнит частично размагничивается.

Исследования показали, что частичное размагничивание уменьшает необратимые изменения не только от влияния внешних магнитных полей, но и от действия температуры, магнитного сопротивления цепи, ударов, тряски, вибраций, улучшает структурную стабильность [23].

Следует отметить, что степень изменения магнитной индукции под действием поля $\pm \Delta H$ зависит не только от величины этого поля, но также от величины коэффициента возврата, формы кривой размагничивания и положения рабочей точки. Так, для бариевых магнитов, у которых коэффициент возврата $\mu_\Delta \approx 1.1$ и кривая размагничивания представляет собой прямую линию, действие внешних полей вызывает практически только обратимые изменения свойств, и, следовательно, в данном случае обработка переменным полем с убывающей до нуля амплитудой с целью повышения магнитной стабильности не имеет смысла.

В таблице 5.2 приведены данные по естественному магнитному старению некоторых магнитотвердых материалов через один год после намагни-

чивания для разных положений рабочей точки магнита (С – в области максимума удельной магнитной энергии, В – выше и Н – ниже этой точки). В таблице также указана величина размагничивания

$$\beta_p = \frac{B_A - B_F}{B_A} \cdot 100\%,$$

обеспечивающая практическое отсутствие магнитного старения, то есть магнитную стабильность свойств во времени при неизменных внешних условиях (с точностью до 0.1%).

В тех случаях, когда к стабильности магнита предъявляются особенно высокие требования в сочетании с большими возможными изменениями внешних условий (механические и температурные воздействия), кроме частичного размагничивания магниты подвергаются температурной обработке и механическим воздействиям.

Таблица 5.2 – Естественное магнитное старение некоторых магнитотвердых материалов

Материал	ЮНДК24			ЮНДК25БА			ЮНДК35Т5			ЮНДК38Т7		
	В	С	Н	В	С	Н	В	С	Н	В	С	Н
Магнитное старение β_B	0.5	0.8	1.7	0.2	0.6	1.5	0.2	0.4	0.6	0.1	0.3	0.5
Размагничивание β_p	4	8	12	2	4	12	2	3	4	11	2	4

Температурная обработка состоит в том, что магнит после частичного размагничивания 3 – 5 раз нагревают и охлаждают до температуры несколько выше и несколько ниже наибольшей ожидаемой. Особенно большие изменения наблюдаются при этом после первого цикла, последующие сказываются значительно меньше. Механические воздействия также повторяют несколько раз, при этом их величина должна превышать максимально возможную при эксплуатации.

В результате магнитной стабилизации (частичного размагничивания, термообработки и механических воздействий) удастся уменьшить необратимые изменения магнитной индукции до сотых долей процента [21].

Дальнейшие изменения магнитных свойств стабилизированного магнита в некотором диапазоне изменений внешних условий (температуры, напряженности поля, механических воздействий) обратимы. Эти изменения можно оценивать соответствующими коэффициентами, например, температурным коэффициентом магнитной индукции

$$\alpha_B = \frac{\Delta B}{B \Delta t}, \quad (5.2)$$

где B – магнитная индукция при начальной температуре; Δt – изменение температуры; ΔB – изменение индукции, вызванной изменением температуры на Δt .

Подобным образом принято оценивать изменения и других параметров – коэрцитивной силы H_c , энергетического произведения $(BH)_{\text{макс}}$ и т.п.

Температурный коэффициент магнитной индукции зависит, кроме химического состава и структуры материала, от относительных размеров магнита (коэффициента размагничивания), а также от t_0 и Δt [22].

Это иллюстрируется рисунком 5.3, на котором изображена зависимость размагничивающегося участка гистерезисной петли от температуры для сплава типа ЮНДК24. Из рисунка видно, что в зависимости от величины коэффициента размагничивания его α_B может быть положительным, отрицательным и равным нулю.

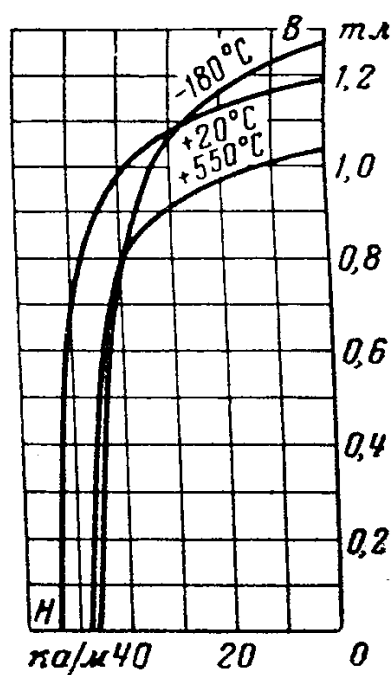


Рисунок 5.3 – Кривые размагничивания сплава типа ЮНДК24

В таблице 5.3 приведены значения температурного коэффициента магнитной индукции в точке максимума магнитной энергии для сплавов типа ЮНДК24 и ЮНДК35Т5. Для магнитов из феррита бария и Pt – Со сплавов температурный коэффициент магнитной индукции не зависит от положения рабочей точки магнита и равен 0.19%/°С и для феррита бария и 0.015%/°С для магнитов Pt – Со.

Таблица 5.3 – Значения температурного коэффициента магнитной индукции в точке максимума магнитной энергии

Материал	α_B среднее в указанном диапазоне, %/°С							
	-200 ÷ -100	-100 ÷ +20	+20 ÷ 100	+100 ÷ 200	+200 ÷ 300	+300 ÷ 400	+400 ÷ 500	+500 ÷ 600
ЮНДК24	+0.015	-0.02	-0.014	-0.018	-0.023	-0.030	-0.037	-0.041
ЮНДК35Т	+0.025	+0.025	+0.005	-0.008	-0.015	-0.019	-0.024	-0.023

Для материалов, в которых α_B зависит от коэффициента размагничивания, приближенную оценку величин α_B и обратимых и необратимых измене-

ний магнитной индукции для любой рабочей точки можно получить, если известны температурные зависимости остаточной магнитной индукции и коэрцитивной силы материала. На рисунке 5.4 приведены относительные температурные изменения остаточной индукции $m_B = B_{rt}/B_{r20}$ и коэрцитивной силы $m_H = B_{ct}/B_{c20}$ для некоторых материалов. Эти величины при небольшом изменении химического состава, а также при наличии кристаллической анизотропии практически не меняются.

В зависимости от соотношения между изменением остаточной индукции и коэрцитивной силы обратимое $\Delta B_0/B$ и необратимое $\Delta B_H/B$ изменения магнитной индукции вычисляются по разным формулам.

$$\text{Если } m_B < 1, m_H < 1, m_B > m_H \frac{tg\delta}{\mu + tg\delta},$$

то

$$\frac{\Delta B_0}{B} = m_H \frac{tg\delta}{\mu + tg\delta} \cdot \frac{\mu_\Delta}{\mu + \mu_\Delta} \cdot 100\% \quad (5.3)$$

$$\frac{\Delta B_H}{B} = m_H \frac{tg\delta}{\mu + tg\delta} \cdot \frac{\mu_\Delta}{\mu + \mu_\Delta} \cdot 100\% \quad (5.4)$$

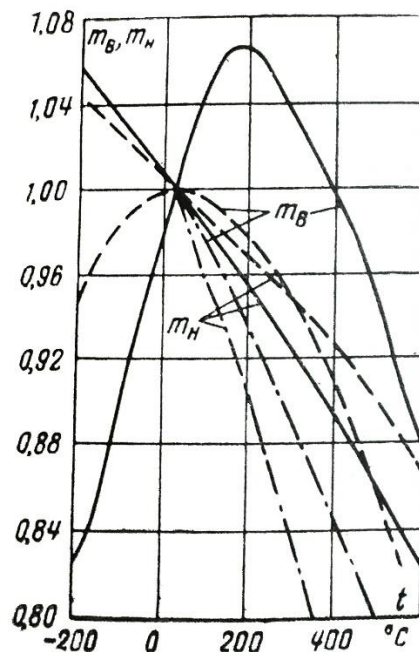


Рисунок 5.4 – Относительные температурные изменения остаточной магнитной индукции m_B и коэрцитивной силы m_H для различных сплавов

При $m_B < 1$, $m_H < 1$, $m_B < m_H \frac{tg\delta}{\mu + tg\delta}$

$$\frac{\Delta B_0}{B} = \left[m_B \frac{\mu_\Delta}{\mu + \mu_\Delta} + \left(m_H \frac{tg\delta}{\mu + tg\delta} - m_B \right) \frac{\mu_\Delta}{\mu + \mu_\Delta} \right] \cdot 100\% \quad (5.5)$$

$$\frac{\Delta B_H}{B} = \left[m_B \frac{\mu_\Delta}{\mu + \mu_\Delta} + \left(m_H \frac{tg\delta}{\mu + tg\delta} - m_B \right) \frac{\mu_\Delta}{\mu + \mu_\Delta} \right] \cdot 100\%. \quad (5.6)$$

Когда $m_B > 1$, $m_H < 1$,

$$\frac{\Delta B_0}{B} = \left[m_B + m_H \frac{tg\delta}{\mu + tg\delta} \frac{\mu_\Delta}{\mu + \mu_\Delta} \right] \cdot 100\% \quad (5.7)$$

$$\frac{\Delta B_H}{B} = m_H \frac{tg\delta}{\mu + tg\delta} \frac{\mu_\Delta}{\mu + \mu_\Delta} \cdot 100\% \quad (5.8)$$

Если $m_B < 1$, $m_H > 1$,

$$\frac{\Delta B_0}{B} = \left[m_B \frac{\mu_\Delta}{\mu + \mu_\Delta} + m_H \frac{tg\delta}{\mu + tg\delta} \frac{\mu_\Delta}{\mu + \mu_\Delta} \right] \cdot 100\% \quad (5.9)$$

$$\frac{\Delta B_H}{B} = m_B \frac{\mu_\Delta}{\mu + \mu_\Delta} \cdot 100\% \quad (5.10)$$

Температурный коэффициент магнитной индукции α_B вычисляется по формуле

$$\alpha_{B(t_2-t_1)} = \frac{\Delta B_{0(t_2-t_1)}}{B_{t_1}} \frac{1}{t_2 - t_1}, \% \cdot \text{град}^{-1}. \quad (5.11)$$

Иногда при эксплуатации постоянные магниты в течение продолжительного времени подвергаются воздействию высоких температур. При повышенных температурах (выше 200°C) наиболее приемлемыми являются железокобальтннкельалюминиевые сплавы типа ЮНДК24 и ЮНДК35Т, так как наряду с высокой точкой Кюри (850°C) эти сплавы обладают высокой структурной стабильностью. До 500°C в этих сплавах не наблюдается структурных изменений, влияющих на величину магнитного потока (при испытаниях в течение одного года). При более высокой температуре время работы постоянных магнитов ограничено. После специальной структурной и магнитной стабилизации постоянные магниты из сплавов типа ЮНДК35Т5 стабильны в течение не менее 2000 часов при 600°C и 80 ч. при 650°C, магниты из сплавов

типа ЮНДК24 2000 ч. при 550°C и 100 ч. при 600°C. Общее старение магнитов за это время не превосходит 1%. При более высокой температуре магнитный поток в постоянных магнитах быстро падает [23].

На рисунке 5.5 приведено общее и структурное старение магнитов с отношением длины к диаметру, равным 4 из сплавов ЮНДК35Т5 и ЮНДК24 при 550 – 700°C за 1000 ч. При определении общего (магнитного и структурного) старения магниты намагничены один раз перед нагревом и выдержкой.

Для определения изменения магнитной индукции в результате структурного старения магниты после выдержки повторно намагничивали до насыщения.

Структурные изменения при 550°C, а в сплавах типа ЮНДК35Т5 при 600°C могут привести к некоторому повышению магнитной индукции при повторном намагничивании до насыщения после выдержки (вследствие упорядочения структуры).

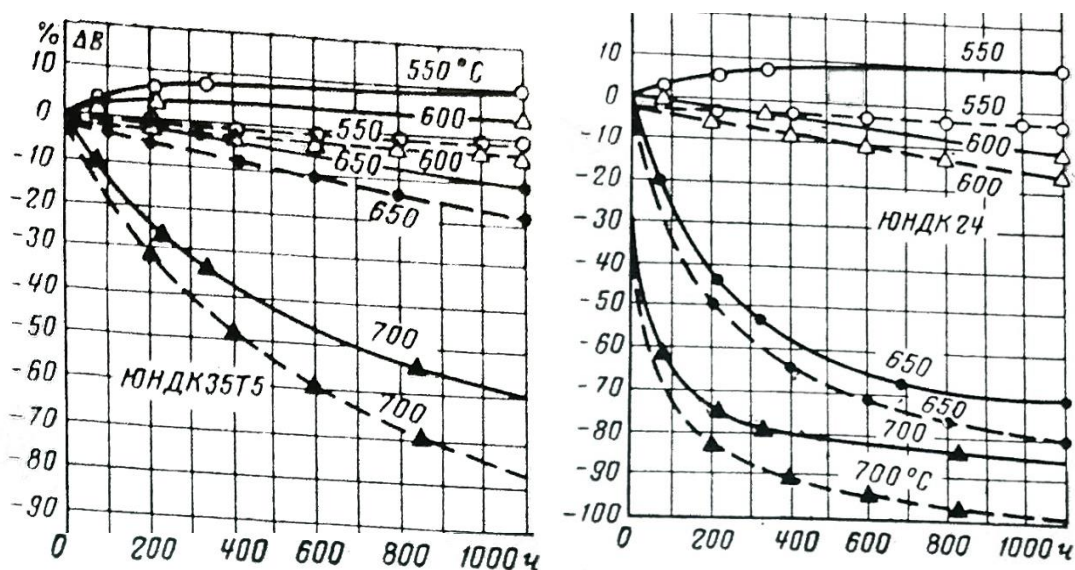


Рисунок 5.5 – Общее (пунктир) и структурное (сплошные линии) старение магнитов с отношением длины к диаметру 4, в течение 1000 ч.

Однако увеличение индукции в результате общего старения магнитов (без повторного намагничивания) как правило не превышает 1% даже в тех случаях, когда повторное намагничивание дает увеличение индукции более чем на 10% (чистое структурное старение).

В литературе имеются некоторые данные по исследованию влияния радиации на свойства магнитов. Так например существуют сведения по действию на различные магнитотвердые материалы быстрых нейтронов в количестве $3 \cdot 10^{17}$ 1/см³ в течение 12 дней. Исследования показали, что изменения свойств находятся в пределах погрешности точности измерений.

Свойства магнита могут существенно изменяться в результате контакта с другими магнитами или ферромагнитными массами.

На рисунке 5.6 приведены кривые уменьшения магнитной индукции в нейтральном сечении магнитов из разных сплавов с отношением длины к диаметру, равным 4, после приближения к ним других таких же магнитов. При хранении и эксплуатации магнитов их нужно защищать от воздействий такого рода.

Проблема стабильности магнитотвердых материалов и магнитных систем изучена далеко не полностью. Для получения достоверных результатов в этой области необходимо накопление большого статистического экспериментального материала, что чрезвычайно трудоемкой задачей.

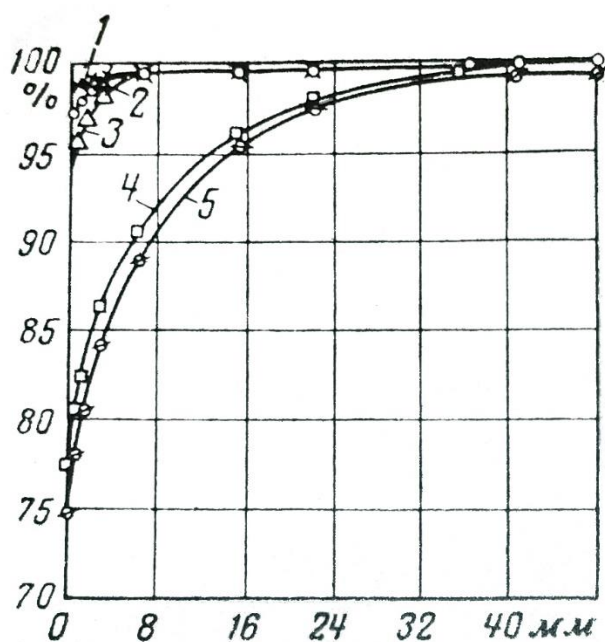


Рисунок 5.6 – Кривые уменьшения магнитной индукции магнитов после приближения к ним других таких же магнитов.

1 – ЮНДК38Т7; 2 – ЮНДК35Т5БА; 3 – ЮНДК35Т5; 4 – ЮНДК25БА;
5 – ЮНДК24.

5.2 Частичное размагничивание как один из методов стабилизации магнитного состояния системы с постоянными магнитами

В тех случаях, когда определяется основная кривая намагничивания, образец перед измерениями должен быть тщательно размагничен. Размагничивание обычно необходимо перед сборкой устройств или узлов, частью которых является постоянный магнит; часто сборка затруднена, если магнит намагничен, так как он притягивает и намагничивает все ферромагнитные детали, что затрудняет их установку. Наконец, частичное размагничивание широко применяется для магнитного остаривания постоянных магнитов, т. е. для стабилизации их свойств во времени [6]

Уменьшение общего потока постоянного магнита на 10% путем частичного размагничивания значительно увеличивает его стабильность во времени. Опыт показывает, что для размагничивания сплавов типа альни—альнико необходима максимальная напряженность размагничивающего поля порядка $2H_c$.

Размагничивание можно проводить в постоянном и переменном магнитном полях. Размагничивание в постоянном поле проводят в том же пермеамetre или электромагните, где определяются магнитные характеристики образца, или он размагничивается в специальной катушке, создающей нужную величину напряженности магнитного поля.

Процесс размагничивания заключается в следующем: образец вставляется в пермеамetre или в центр размагничивающей катушки затем в обмотку катушек подается максимальный ток, создающий нужную напряженность магнитного поля, и производится многократная коммутация тока при медленном уменьшении его величины с помощью реостатов. Продолжительность размагничивания постоянным током примерно 1—2 минуты.

Гораздо проще проводить размагничивание магнитов переменным током частоты 50 Гц (для магнитов толщиной не более 70—80 мм; для магни-

тов большей толщины лучше размагничивание проводить на постоянном токе или на переменном токе меньшей частоты).

Проводить размагничивание переменным током образца, помещенного в пермеамтр, неудобно, так как намагничивающие обмотки последнего имеют большое индуктивное сопротивление и в пермеамтре практически невозможно создать достаточную напряженность размагничивающего поля. Поэтому размагничивание переменным током ведется в специальных катушках с секционированной обмоткой, имеющих небольшую индуктивность. Такая катушка состоит из набора плоских катушек с одинаковыми внутренним диаметром и толщиной, одинаковым числом витков. Все секции соединяются параллельно.

Схематический вид секционированной катушки для размагничивания постоянных магнитов переменным током показан на рис. 5.7

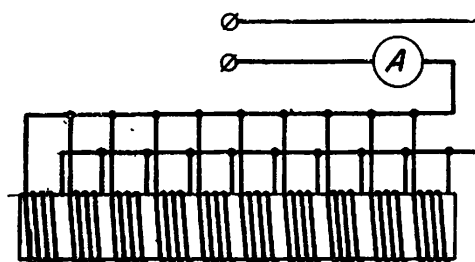


Рисунок 5.7 – Схематическое устройство катушки для размагничивания постоянных магнитов

При большом числе секций, когда индуктивность катушки очень мала, ее можно рассчитать, как катушку, работающую на постоянном токе. Наиболее рационально регулировку тока в таком соленоиде вести с помощью автотрансформатора. Часто применяют другой способ размагничивания. Вместо регулировки тока в катушке медленно вынимают из нее размагничиваемый магнит, после чего ток в ней выключают. Размагничивание более эффективно, если при удалении магнита из катушки его одновременно вращать вокруг короткой оси. Этот способ самый простой и в большинстве случаев дает положительные результаты. При изготовлении катушки переменного тока ее

каркас следует делать из изоляционного материала для предупреждения возникновения в нем вихревых токов [24].

Начальными данными для осуществления частичного размагничивания выступают: начальное и конечное состояния образца. Изменение от исходного положения в конечное проводится в результате подачи серии импульсов размагничивающего поля, при этом любой дальнейший импульс обязан обладать амплитудой, большей чем прошлый импульс на некую величину шага ΔH_i .

В связи с вышесказанным, нужно отметить соответствующие стадии реализации процесса неполного размагничивания: 1) знание значения уровня намагниченности; 2) подбор шага ΔH_i ; 3) приток размагничивающего импульса $H_{i+1} = H_i + \Delta H_i$; 4) сопоставление значения данной намагниченности с окончательной степенью намагниченности; 5) выключение установки вслед за достижением намагниченности.

Размагничивающее поле пропорционально значению заряда емкостной батареи U_3 , которая разряжается на индуктор. Для управления уровня поля образца можно воспользоваться подъемной силой P , которая определяется через тензодатчика. В итоге процесс неполного размагничивания образца может быть показан связью $P(U_3)$ (рис.5.8). Причем образование импульсов происходит по оптимальному закону, представленному в следующем виде:

$$U_{3i} = U_{3(i-1)} + ktg\varphi(P_{i-1} - P_{\text{кон}}),$$

где U_{3i} – напряжение заряда батареи в i -м цикле размагничивания; $U_{3(i-1)}$ – напряжение заряда батареи в $(i-1)$ -м цикле размагничивания; P_{i-1} – подъемная сила образца после влияния $(i-1)$ -го размагничивающего импульса; φ – угол наклона ступенчатой аппроксимации, находимый от типа образца необходимой степени размагничивания $P_{\text{кон}}$; k – масштабный коэффициент.

Для уменьшения числа импульсов следует сделать так, чтобы начальный импульс формировал размагничивающее поле, которое приводит к размагничиванию до определенного уровня образца из группы с наименьшей

коэрцитивной силой. Затем выбирается так называемый принцип равного наклона, при этом угол наклона φ находится через угол наклона касательной кривой $P(U_3)$ в крайнем значении подъемной силы, то есть точка $P_{\text{кон}}$ на рисунке 5.8 [25].

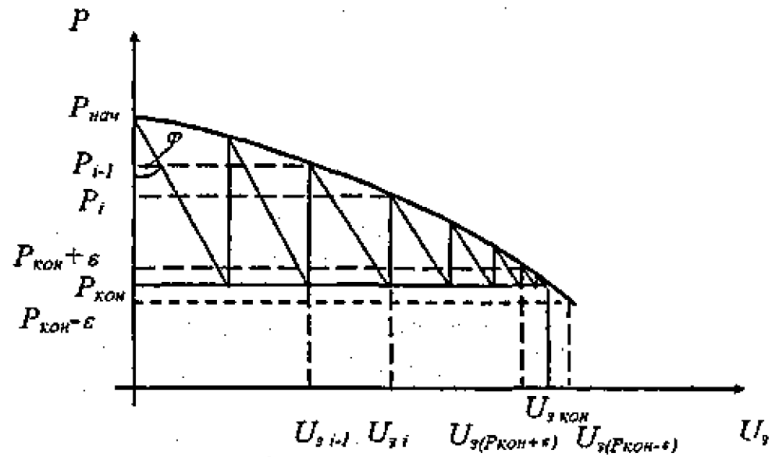


Рисунок 5.8 – Графическое видение частичного размагничивания.

5.3 Расчет импульсного индуктора для частичного размагничивания

Индуктор рассчитан для работы в структуре установок импульсного намагничивания. Он позволяет осуществлять частичное размагничивание постоянных магнитов. Для размагничивания следует применять импульсное магнитное поле обратной полярности, или серию магнитных импульсов с чередующейся полярностью и уменьшающихся по амплитуде. При выборе индуктора важно обратить внимание на то, чтобы в рабочей области занимаемой требующей обработки образца, поле индуктора было однородным и не было паразитных компонентов поля, таких как радиальных составляющих поля [26].

На рисунке 5.9 представлен чертеж предлагаемого индуктора. Как видно из рисунка он состоит из семи секций может иметь разные радиусы. С целью уменьшения радиальной составляющей поля индуктора важно правильно выбрать величины радиусов секций индуктора. Длина каждой секции индуктора равна единице в относительных величинах.

$$H_z = \frac{I}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(z_0 - z)^2 + (r_0 + r)^2}} \left[\frac{r_0^2 - r^2 - (z_0 - z)^2}{(r_0 - r)^2 + (z_0 - z)^2} E + K \right]$$

Рисунок 5.9 – Чертеж предложенного индуктора

Как известно из [26] лучшим вариантом радиусов секций индуктора будет такой: $R_1=1.15$, $R_2=R_3=1$, $R_4=R_5=2$, $R_6=R_7=3$ (этот вариант изображен на рис. 5.9)

Расчет индуктивности индуктора

Необходимые значения магнитных полей для размагничивания постоянных магнитов возможно получить исключительно в импульсном режиме. Для того чтобы определить импульсную токовую характеристику индуктора, вначале нужно рассчитать индуктивность индуктора. Установлено, что индуктивность проводника $L = \Psi/I$, где Ψ – потокосцепление самоиндукции, которое в случае кругового проводника $\Psi = \mu_0 2\pi \int H_z r dr$, где как описано в [26] r – координаты точки наблюдения,

(5.12)

В формуле (5.12) K и E представляют собой эллиптические интегралы первого и второго рода соответственно, которые являются специальными функциями, находящиеся в соответствующих справочниках, например, в этом [27]. z_0 и r_0 – цилиндрические координаты петли с током I . Таким образом исходя из (5.12) получим следующее выражение

$$L = \Psi / I = \mu_0 \int_0^{r_0} \frac{z}{\sqrt{(z_0 - z)^2 + (r_0 + r)^2}} \left[\frac{r_0^2 - r^2 - (z_0 - z)^2}{(r_0 - r)^2 + (z_0 - z)^2} E + K \right] dr.$$

Интегрирование этой формулы представляется весьма трудной задачей, в связи с этим расчет индуктивности индуктора произведем численно. Тогда получим $L=12 \cdot 10^{-6}$ Гн, при условии, что наименьший радиус индуктора принят за 30 мм эквивалентные единицы в относительных величинах.

Заодно определим сопротивление проводника семи секционного индуктора. Учитывая, что шаг намотки равен 1.30 мм, и применяя проводник кругового сечения с диаметром, соответствующим шагу намотки, то количество витков в каждой секции будет равно 20. Принимая во внимание радиусы секций, после вычислений найдем длину проводника равную 211 м. Поскольку удельное сопротивление медного проводника равно 0.018 (Ом·мм²)/м, то полученное сопротивление проводника $R=3.2$ Ом. Эта величина является довольно большой, поэтому для снижения R можно воспользоваться несколькими параллельными проводниками, которые следует намотать близко друг к другу. При этом индуктивность индуктора поменяется не сильно из-за увеличения радиуса намотки.

Расчет импульсной работы индуктора

Для того чтобы создать импульсное магнитное поле, индуктор присоединяется через коммутатор к конденсаторной батарее, заряженной до напряжения U_0 и обладающей емкостью C . Дифференциальное уравнение для тока в такой цепи будет иметь вид

$$R_1 + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = U_0.$$

Решение этого уравнения относительно тока I есть в работах [28, 29]. Оно пишется в следующем виде:

$$i_1(t) = \frac{U_0}{\omega L} e^{-\alpha t} \sin \omega t, \quad (5.13)$$

при условии что $\frac{1}{LC} > \alpha^2$, где $\alpha = \frac{R}{2L}$; $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \alpha^2}$; R и L – сопротивление и индуктивность индуктора соответственно, а C – емкость конденсаторной батареи; U_0 – начальное напряжение на конденсаторной батарее.

Из [26] известно, что оптимальным выбором сопротивления R будет полученное значение из формулы $R = \sqrt{\frac{L}{C}}$. Подставляя значение рассчитанной емкости батареи в 4 главе и значение индуктивности индуктора, получим $R=0.03$ Ом . Рассчитаем импульсный ток, который образуется в индукторе используя формулу (5.13). $I=13074$ А. Для определения амплитуды тока можно воспользоваться формулой

$$I_m = \frac{U_0}{e} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

Таким образом расчетное значение амплитуды тока составляет 4089 А.

Обратимся к статье [26], в которой авторы произвели расчет зависимости тока индуктора от времени по формулам представленным ниже и (5.13)

$$i_2(t) = \frac{U_0 t}{L} e^{-\alpha t}, \quad (5.14)$$

при $\frac{1}{LC} = \alpha^2$;

$$i_3(t) = \frac{U_0}{\beta L} e^{-\alpha t} \operatorname{sh} \beta t, \quad (5.15)$$

при $\frac{1}{LC} < \alpha^2$, где $\beta^2 = -\omega^2$.

Для этого расчета были использованы следующие параметры электрической цепи для проектируемого индуктора: $R=0.2$ Ом , $C=10^{-2}$ Ф, $L=12 \cdot 10^{-6}$ Гн, $U_0 = 600$ В. Итог данного вычисления изображен в виде кривой 1 на рисунке 5.10 . На этом же рисунке кривая 2 – это итог вычислений с такими же параметрами, за исключением значения индуктивности L, которую увеличили в пять раз. Максимальный ток в этом случае составляет 2400 А. Если увеличить L в десять раз от заданного значения , то получится

кривая 3. При этом ток незначительно уменьшится и составит 2140 А. Кривые 4 и 5 на рисунке 5.10 представляют собой отличие от кривой 1, емкость уменьшалась в пять раз (кривая 4) и в 10 раз (кривая 5).

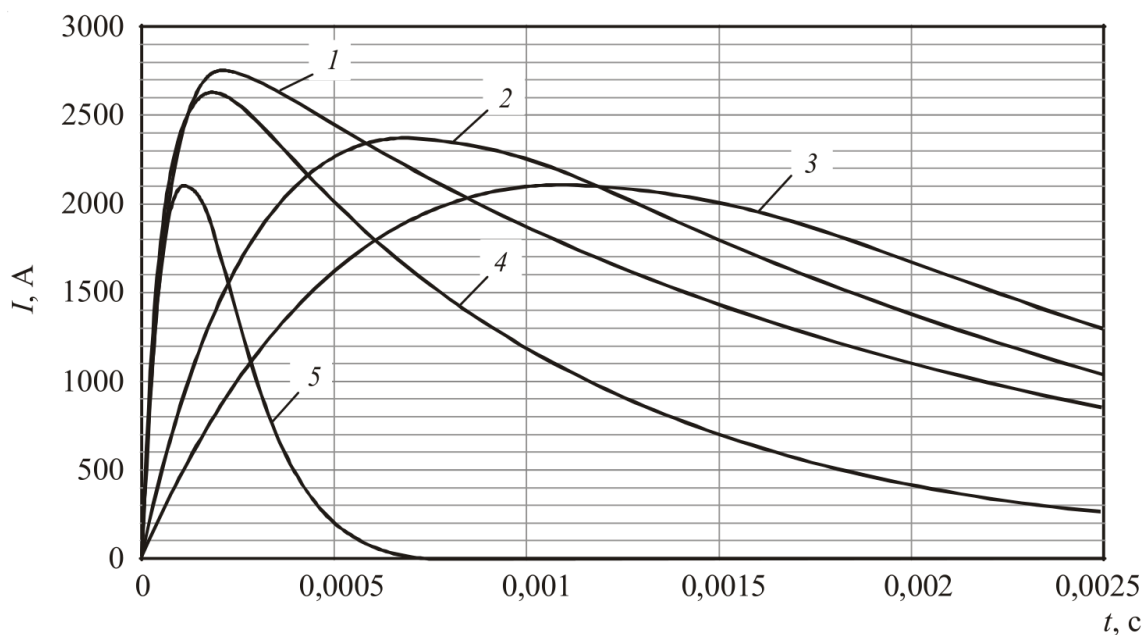


Рисунок 5.10 Зависимость тока в индукторе от величин L и C .

На основании рисунка 5.10 и проделанных расчетов, следует вывод, заключающийся в том, что увеличение емкости конденсаторной батареи растягивает задний фронт импульса и незначительно оказывает воздействие на передний фронт. Увеличение индуктивности индуктора главным образом растягивает передний фронт импульса.

5.4 Расчет трансформатора для магнитной стабилизации свойств постоянных магнитов

Магнитная стабилизация осуществляется чаще всего путем воздействия на постоянный магнит переменного поля с убывающей до нуля амплитудой. Для создания такого поля удобно использовать импульсную намагничивающую установку ИНУ с трансформатором Tr , изображенную на рисунке 5.11. Первичная обмотка ω_1 трансформатора включается в разрядную цепь ИНУ, вторичная обмотка ω_2 вместе с емкостью C_2 и обмоткой ω_3 , наложенной на стабилизируемую магнитную систему MC , представляют собой колебательный контур [30].

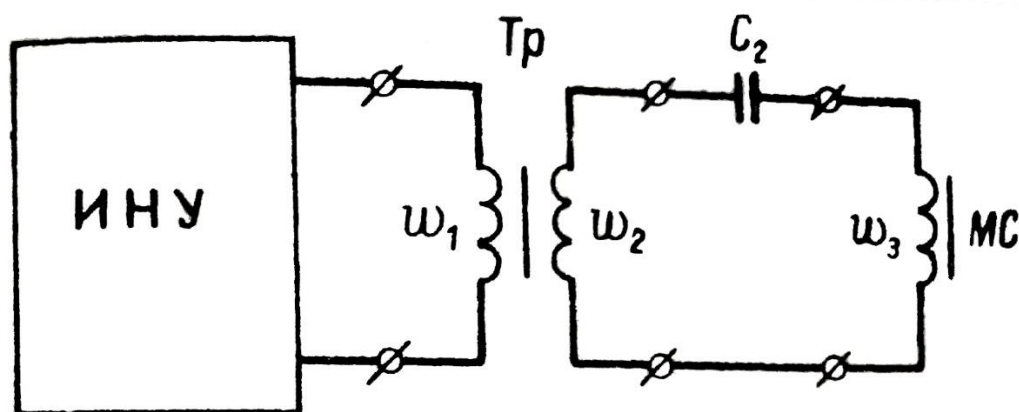


Рисунок 5.11 Импульсная установка с трансформатором

При подаче в первичную цепь обмотки ω_1 импульса ИНУ во вторичной цепи Тр возникают затухающие колебания, которые производят магнитную стабилизацию, частично размагничивания при этом МС.

В литературе отсутствуют рекомендации по выбору параметров трансформаторов, применяемых для решения поставленной задачи. Поэтому рассмотрим этот вопрос поподробнее.

Для стабилизации необходимо обеспечить:

1. Заданное значение амплитуды первого импульса стабилизирующего поля $H_{ст}$. Величину $H_{ст}$ обычно принято задавать в полях коэрцитивной силы H_c материала магнита, то есть

$$H_{ст} = kH_c, \quad (5.16)$$

где $k < 1$ – коэффициент, выбранный в зависимости от ожидаемых значений возмущающих полей;

2. Максимально – допустимую частоту ω_n затухающих колебаний, при которой весь объем магнита промагничивается полем $H_{ст}$;
3. Согласование первичной и вторичной цепей с целью получения максимального энергетического к.п.д.

На рисунке 5.12 приведена эквивалентная электрическая схема устройства. Для выполнения условия (5.16) требуется, чтобы амплитудное значение тока первого импульса во вторичной обмотке

$$I_m = \frac{k H_c l}{\omega_3}, \quad (5.17)$$

где l – средняя длина магнитной линии.

Отсюда сечение сердечника трансформатора можно определить, как

$$I_m = \sqrt{P_{\text{ср}}} \frac{2I_m}{\pi} \sqrt{r_2} = \frac{2k H_c l}{\pi \omega_3} \sqrt{r_2}, \quad (5.18)$$

где $P_{\text{ср}}$ – средняя мощность трансформатора за полупериод, r_2 – активное сопротивление вторичной цепи трансформатора. Примем, что эквивалентная индуктивность $L_{\text{ЭКВ}}$ обмотки с магнитом равна статической индуктивности $L_{\text{СТ}}$.

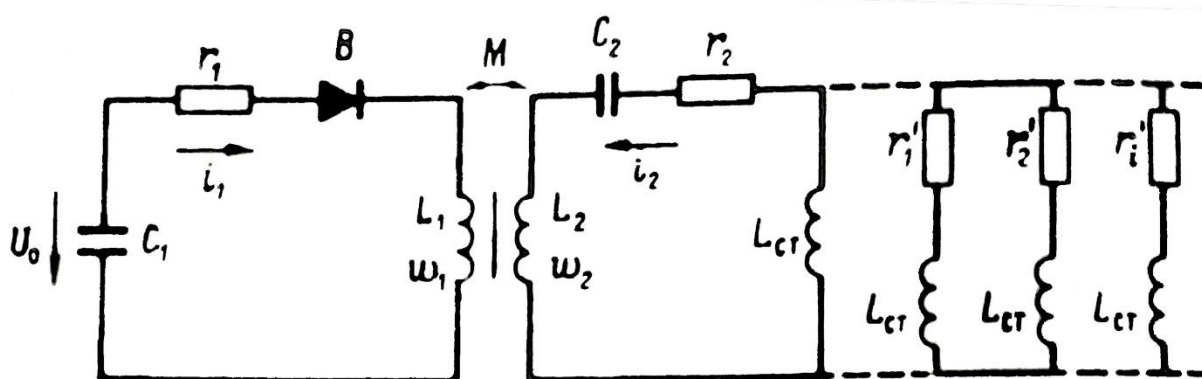


Рисунок 5.12 Эквивалентная электрическая схема устройства

Частоту $\omega_{\text{п}}$ определим при условии, что статическое индуктивное сопротивление $x_{\text{СТ}} \gg z_1$, где z_1 – модуль комплексного сопротивления первой параллельной ветви. Это можно представить следующим образом:

$$\omega_{\text{п}} L_{\text{СТ}} = \frac{\sqrt{(r'_1)^2 + (\omega_{\text{п}} L_{\text{СТ}})^2}}{k_1}, \quad (5.19)$$

где $k_1 > 10$.

Для образца в виде бесконечно длинного цилиндра с радиусом R из материала с магнитной проницаемостью μ и удельной электропроводностью γ уравнение (5.19) может быть представлено в виде

$$\omega_{\text{п}} = \frac{g_1^2}{\mu \gamma R^2 \sqrt{k_1^2 - 1}} \approx \frac{14.7}{\mu \gamma R^2 k_1}, \quad (5.20)$$

где $g_1 = 3.83$ – значение первого нуля бесселевой функции первого рода порядка. Из (5.20) можно определить длительность полупериода

$$\tau = \frac{\pi}{\omega_{\Pi}} \approx 0.2 \mu\gamma R^2 k_1. \quad (5.21)$$

Пусть имеем частный случай кольцевого сердечника с наружным диаметром D_1 , внутренним - D_2 квадратного сечения. Из условия допустимой степени однородности магнитного поля в сердечнике выбираем $D_1/D_2=3$. Тогда формулу (5.18) можно переписать в следующем виде:

$$D_2 = \frac{4k H_c \sqrt{r_2}}{\omega_3}. \quad (5.22)$$

Обычно на практике магнитная стабилизация производится непосредственно после намагничивания системы. Поэтому в качестве обмотки ω_3 используется намагничивающая обмотка. Сопротивление r_2 ориентировочно можно принять равным 0.2-0.3 Ом.

Определение чисел витков ω_1 и ω_2 может быть выполнено из упомянутого ранее условия согласования контуров трансформатора и предельной частоты ω_{Π} и в общем случае представляет достаточно сложную задачу, требующую применения средств вычислительной техники.

Вопросы можно упростить, считая, что коэффициенты затухания контуров малы. Тогда число витков могут быть определены по формулам:

$$\omega_2 = \frac{\tau}{\pi \sqrt{k_L C}}; \quad (5.23)$$

$$\omega_1 = \omega_2 \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}. \quad (5.24)$$

Здесь k_L – коэффициент, определяемый из выражения:

$$k_L = \frac{\mu_c S}{l}; \quad (5.25)$$

где μ_c – магнитная проницаемость материала сердечника трансформатора.

Выводы: В этой главе были описаны принципы магнитной неустойчивости, выяснены ее причины, описано как избежать неустойчивости путем

размагничивания. Было выявлено, что частичное размагничивание уменьшает необратимые изменения во времени и влияние внешних магнитных полей на магнит или изделие. Была представлена возможная схема индуктора, а также произведен расчет индуктора, получено расчетное значение тока. Проанализированы формы импульсов при разных параметрах емкостной батареи и индуктивности индуктора.

6 СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

6.1 Обоснование СВОБ

«В условиях научно-технического прогресса, быстро растущего производства, внедрения новых техники и технологий, роста роли человека на производстве и социальной значимости безопасных и здоровых условий труда, проблема безопасности жизнедеятельности приобретает особую актуальность.

В результате техногенной деятельности человека существенно изменилась биосфера, условия обитания человека. Глобальный характер возникшей экологической опасности требует от человечества колоссальных усилий для налаживания разумного взаимодействия с природой для сохранения жизни на Земле.

Только путем осознания существующей экологической ситуации человечество сможет успешно эволюционировать.

Особую остроту проблема безопасности имеет в Российской Федерации.

В условиях, несоответствующих требованиям норм законодательства по запыленности, загазованности, шуму, вибрации, другим производственным факторам, работают миллионы людей. Развитие производства поставило ряд регионов на грань экологической катастрофы.

Нормативно-правовые акты, принятые в нашей стране, направлены на обеспечение условий труда, отвечающих требованиям сохранения жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности. Они содержат ряд важных положений, обеспечивающих для работающих гарантии прав на охрану труда» [31].

6.2 Общая характеристика условий применения

Разрабатываемая импульсная намагничивающая установка предназначена для намагничивания образцов (постоянных магнитов) и будет использоваться в промышленных помещениях, приборостроительных заводах, а также

лабораториях. В конденсаторной батарее установки накапливается большая энергия, которая может представлять опасность для обслуживающего персонала в случае несоблюдения правил эксплуатации и техники безопасности.

Необходим ряд мероприятий, обеспечивающих безопасность обращения с разработанной установкой.

Корпус установки должен быть заземлен. Все подключения к установке должны быть произведены при отключенном напряжении питания установки. На лицевой панели прибора установлена планка из оргстекла, изолирующая корпус от выходных клемм. Для контроля за напряжением на выходных клеммах используется вольтметр на передней панели. Правым тумблером необходимо разряжать конденсаторную батарею, полный разряд которой контролируется по вольтметру.

Устройство должно храниться в сухом помещении в соответствии с условиями хранения 1 ГОСТ 15150-69. В помещении для хранения не должно быть токопроводящей пыли, паров кислот и щелочей, а также газов, вызывающих коррозию и разрушающих изоляцию.

Основными параметрами условий эксплуатации являются:

- атмосферное давление от 640 до 790 мм рт.ст. (от 85 до 105 кПа);
- температура окружающей среды от 10 до 33 °С;
- относительная влажность до 70 % при температуре до 33°С .

6.3 Характеристика специальных вопросов безопасности

В соответствии с ГОСТ 12.0.003-2015 "Система стандартов по безопасности труда. опасные и вредные производственные факторы. классификация" проанализируем потенциально опасные и вредные факторы, присущие работе и утилизации изделия.

Первым основанием для получения травм и заболеваний, имеющих связь с процессом труда, значит, неблагоприятное влияние на организм обременённого трудом человека тех или иных факторов производственной среды и трудового процесса. Эта реакция, приводящая в разных обстоятельствах к разнообразным результирующим последствиям, подчинена присут-

ствию в условиях труда того или иного фактора, ее допустимо отрицательных для организма человека свойств, потенциал его прямого или опосредованного действия на организм, характера ответной реакции организма, обусловленной интенсивностью и длительностью воздействия существующего фактора.

Производственные факторы становятся частным случаем факторов окружающей человека среды обитания и человеческой работе, связанной и (или) вызванной производственной и трудовой деятельностью.

Вид и результаты воздействия производственного фактора на жизнь и здоровье работающего человека в каждом случае определены и различны, а в некоторых случаях и единственны, и зависят от взаимодействия совокупности условий и положения. Сделанные на этих совокупностях классификации нередко не образуют иерархически вложенных друг в друга подмножеств, а становятся в конкретном смысле независимыми. Для нормализации производственных факторов при их классификации должны быть применены шкалы наименований и порядка, потому что само по себе название производственного фактора (сокращенное) не допускает понять его потенциал причинения вреда, загруженного работой человеку.

«Опасными и вредными производственными факторами могут быть следующие:

- повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны;
- повышенный уровень шума на рабочем месте;
- повышенная или пониженная влажность воздуха;
- повышенная или пониженная подвижность воздуха;
- повышенная или пониженная ионизация воздуха;
- повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека;
- повышенный уровень статического электричества;
- повышенный уровень электромагнитных излучений;
- отсутствие или недостаток естественного света;

- недостаточная освещенность рабочей зоны;
- прямая и отраженная блескость;
- повышенная пульсация светового потока.» [32].

В разработанной намагничивающей установке отсутствуют вышеописанные опасные производственные факторы, при соблюдении условий эксплуатации, описанных в п. 6.2.

При проектировании установки и ее разработке технической документации подавляющую долю времени забирает работа на ПК. Вред продолжительного использования ПК, как правило, связан с вредным излучением монитора и системного блока компьютера, неправильным принятием сидячего положения в течение продолжительного времени. Таким образом, основными последствиями, получаемые человеком при проектировании изделия следующие:

- нарушение осанки позвоночника;
- ухудшение зрения;
- головные боли.

«Согласно ГОСТ Р 15.201–2000 “Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения” на основе исходных требований заказчика (при его наличии) разработчик продукции проводит необходимые научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы, обращая особое внимание на обеспечение следующих требований:

- безопасности, охраны здоровья и окружающей среды (в том числе их сохраняемости в процессе эксплуатации продукции);
- ресурсосбережения;
- установленных для условий использования продукции значений показателей, определяющих её технический уровень;
- устойчивости к внешним воздействиям;
- взаимозаменяемости и совместимости составных частей и продукции в целом» [32].

Разработка и постановка продукции на производство в общем случае предусматривает:

- 1) разработку ТЗ на опытно-конструкторскую работу (ОКР);
- 2) проведение ОКР, включающей:
 - разработку технической документации [конструкторской (КД) и технологической (ТД)],
 - изготовление опытных образцов,
 - испытания опытных образцов,
 - приемку результатов ОКР;

В соответствии с нормативными документами необходимо определять риски по безопасности и (если требуется) предоставлять гарантии, устанавливать требования и функции для обеспечения безопасности. К ней относятся риски, связанные с методами работы и поддержки, со здоровьем и с безопасностью, воздействиями окружающей среды и др. При этом нужно использовать соответствующие стандарты и признанные достижения практики в профессиональной сфере. Следует идентифицировать риски и, если предоставляются гарантии, устанавливать все допустимые области защиты устройства, включая физические, процедурные, коммуникационные и защиты от излучений. Требуется установить функции, которые могут воздействовать на защищённость системы, в том числе на доступ к ней, и имеют все шансы нанести вред персоналу. Нужно определять требуемые функции защищённости, включая уменьшение и сдерживание угроз, указывая на соответствующие стандарты и признанные достижения практики как на обязательные или уместные.

«Специальные вопросы обеспечения безопасности по стандартам на виды изделий - требования:

- к уровням шума, радиации, излучения;
- к уровню вредных и опасных воздействий, возникающих при работе изделия;
- по безопасности при монтаже, использовании, техническом обслуживании;

живании и ремонте (при необходимости);

- по электробезопасности;
- по радиационной, пожаро- и взрывобезопасности – для соответствующих видов изделий;
- к температуре наружных частей изделия;
- требования к токсичности изделия, материалов и покрытий (при необходимости)» [32].

Если в разработанной установке в качестве коммутатора установлен игнитрон, то важно соблюдать меры предосторожности, поскольку в игнитроне содержится ртуть. При транспортировке упаковывать игнитроны следует в герметичный ящик (возможен вариант стальной либо полиэтиленовой бочки), освободив от заводской упаковки. Вскрытие упаковки необходимо поскольку, бывают случаи пробоя игнитронов в упаковке, т.е. внешне упаковка целая, но при транспортировке загрязнение транспорта ртутью из разбитого игнитрона обеспечено. Игнитроны для транспортировки следует располагать токовыводом вверх и зафиксировать это положение. Верхнее положение можно определить по причине того, что у игнитронов конструктивно в верхней крышке прибора находится стеклянный спай, который обеспечивает изоляцию токовывода от корпуса.

При завершении жизненного цикла игнитрона, его необходимо утилизировать, а именно сдать на предприятие, специализирующееся на утилизации ртути.

6.4 Электробезопасность

6.4.1 Электробезопасность при проектировании

Вся деятельность, относящаяся с проектированием установки и написанием технической документации, ведутся с использованием ПК. В помещении используются ПК, в которых блок питания системного блока кроме рабочей изоляции имеет элемент зануления, к блоку питания подключен провод с защитной жилой (РЕ). Все питающие кабели обязаны соответствовать ГОСТ 12.2.007.14-75 «Кабели и кабельная арматура»

6.4.2 Электробезопасность при эксплуатации

Разрабатываемая установка должна быть безопасной при ремонте и эксплуатации, иными словами, в любых эксплуатационных ситуациях должна быть обеспечена невозможность поражения обслуживающего персонала и посторонних лиц электрическим током, травмирования электрической дугой.

Требования безопасности, записанные в Правилах устройства электроустановок (ПУЭ), государственных стандартах, Правилах технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭЭП), обеспечиваются разработчиком принятием соответствующих схемных решений и выбором конструкции устройства, а пользователем – соблюдением необходимых мер безопасности в процессе эксплуатации.

Опасность поражения электрическим током возникает при прикосновении человека к токоведущим частям (прямое прикосновение или прямой контакт) или к нетоковедущим проводящим электрический ток частям изделий, случайно оказавшимся под напряжением при снижении сопротивления изоляции или при замыкании на них одной из токоведущих частей (непрямое прикосновение или косвенный контакт).

Защиту человека от воздействий напряжения прикосновений и токов обеспечивают конструкции электроустановок, технические средства защиты организационные и технические мероприятия по ГОСТ Р 12.1.019-2009 «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты».

Для защиты от случайного прикосновения к токоведущим частям и надежности работы устройства были приняты следующие меры:

- установлены защитные оболочки, то есть все токоведущие
- контакты изолированы от прикосновения человека;
- безопасное расположение токоведущих частей, то есть все токоведущие разъемы располагаются на задней части устройства, и имеют не-

большое углубление для того, чтобы человек не мог прикоснуться к токоведущим частям прибора.

Система по условиям электробезопасности относится к системам до 1000 В. Специальных мероприятий по защите персонала от электромагнитного излучения не требуется. Установка не создает негативных вибраций.

Наиболее правильным способом обеспечения электробезопасности является применение разделяющих трансформаторов. Тогда цепь питания переводится в режим сети, изолированной от земли (сеть IT ГОСТ Р 50571.3-2009 «Электроустановки низковольтные. Часть 4-41. Требования для обеспечения безопасности. Защита от поражения электрическим током»), с малой емкостью и высоким сопротивлением изоляции полюсов, когда значение напряжения прикосновения близко к нулю.

6.5 Электромагнитная безопасность

«Согласно ГОСТ 12.1.006–84 «Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочем месте и требования к проведению контроля» если частота входит в диапазон от 30 МГц до 300 ГГц при мощности менее 100 Вт измерения плотности потока энергии ЭМП допускается не проводить, т.е. разрабатываемое устройство не несет угрозы опасного воздействия электромагнитного поля» [32].

Поскольку проектируемая установка генерирует кратковременные магнитные импульсы, важно рассмотреть уровни допустимого магнитного поля, и как уменьшить их влияние персонал.

«Оценка и нормирование предельного магнитного поля (ПМП) определяется по уровню магнитного поля дифференцированно в зависимости от времени его воздействия на работника за смену для условий общего (на все тело) и локального (кисти рук, предплечье) воздействия.

Уровень ПМП оценивают в единицах напряженности магнитного поля (Н) в А/м или в единицах магнитной индукции (В) в мТл. ПДУ напряженности (индукции) ПМП на рабочих местах представлены в таблице 6.1» [33].

«При необходимости пребывания персонала в зонах с различной напряженностью (индукцией) ПМП общее время выполнения работ в этих зонах не должно превышать предельно допустимое для зоны с максимальной напряженностью» [33].

Таблица 6.1 – ПДУ постоянного магнитного поля

Время воздействия за рабочий день, минуты	Условия воздействия			
	общее		локальное	
	ПДУ напряженности, кА/м	ПДУ магнитной индукции, мТл	ПДУ напряженности, кА/м	ПДУ магнитной индукции, мТл
0—10	24	30	40	50
11—60	16	20	24	30
61—480	8	10	12	15

Один из возможных способов сохранения здоровья работника, вынужденно находящегося в зоне активности мощных источников магнитного поля, выступает жесткое ограничение времени его нахождения в таких условиях 1,5–2 ч за рабочую смену. Иной путь состоит в применении специальных замкнутых защитных экранов из магнитомягких материалов, надежно защищающих персонал от влияния магнитных силовых линий. Особое внимание при работе в магнитном поле надлежит предоставлять защите рук.

6.6 Пожаробезопасность изделия

«Пожаро- и взрывобезопасность должна обеспечиваться в соответствии с Техническим регламентом о требованиях пожарной безопасности, Нормами пожарной безопасности НПБ 247–97, Правилами пожарной безопасности в Российской Федерации, некоторыми строительными нормами и правилами, а также государственными стандартами» [32].

Разработанная установка соответствует ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования» по пожарной безопасности.

Оценка пожарной опасности электротехнических изделий производится по алгоритму, приведенному в ГОСТ Р МЭК 60695-1-1–2003.

Пожарная опасность характерна для каждой электрической цепи. Отбором материалов, компонентов и самой конструкцией оборудования пожарный риск следует снижать настолько, чтобы он не был существенным даже в аварийных режимах, при неверной эксплуатации или при ошибках, допущенных в производстве продукции. Необходимо, чтобы спроектированные изделия не были источником возгорания, но если оно все равно происходит, то пожарная опасность ограничивалась бы лишь самим изделием и пожар не распространился за пределы оболочки изделия. Если изделия сами подвергаются пожарной опасности от внешнего источника, нужно, чтобы они не содействовали развитию пожара в большей степени, чем строительные материалы или конструкции, являющиеся источником возгорания.

В случае возгорания в рабочей зоне, в первую очередь, непременно должны быть огнетушители, их тип и порядок применения оговариваются ГОСТ 12.1.004–91. Инструментами пожаротушения выступают углекислотные огнетушители типа ОУ-2, ОУ-5, ОУ-8, при этом их должно быть не менее двух.

Должны выполняться следующие требования:

- присутствие в помещении пожарной сигнализации, срабатывающей на задымленность и средств уведомления о пожаре;
- присутствие в помещении автоматической системы отключения питания в случае возгорания;
- выполнение инструктажа по пожарной безопасности с персоналом;
- использование дополнительных средств пожаротушения;
- желательно сохранять температуру и давление среды, при которых увеличение пламени исключается.

Пожаробезопасность повышается за счет того, что используемые строительные конструкции обладают требуемой огнестойкостью, то есть способностью сохранять под действием высоких температур пожара свои рабочие функции, связанные с огнеупорной, теплоизолирующей или

несущей способностью.

Проектируемое изделие соответствует следующим пунктам:

а) Сконструировано и изготовлено так, что оно не представляет пожарной опасности в нормальных условиях эксплуатации и при аварийных режимах.

б) Применяемые в конструкции установки, устройства, элементы, блоки и узлы гарантируют вероятность появления пожара не более 10^{-6} в год.

в) Цепи питания установки имеют защиту от токов перегрузки и короткого замыкания.

г) В возможных зонах перегрева выполнено экранирование элементов и узлов.

д) Возникновение пожароопасной ситуации по вине разрабатываемого устройства невозможно согласно ГОСТ 12.1.018-93

«При нормальной и при аварийной работах электронных изделий ни один из элементов конструкции не должен иметь температуру выше допустимых значений, установленных ГОСТ 12.2.006, а для изделий вычислительной техники – ГОСТ Р 50377» [32].

«Теплостойкость конструкционных и электроизоляционных материалов определяется по ГОСТ 27570.0 при температуре (75 ± 2) °С для наружных частей и (125 ± 2) °С – для частей, удерживающих токоведущие части в определенном положении. Испытания могут быть проведены вдавливанием шарика в материал по ГОСТ Р 50377» [32].

Выводы: В этом разделе были представлены задачи, сопряженные с безопасностью при разработке и использовании импульсной намагничивающей установки. Были представлены основные условия использования установки, были описаны главные электрические, электромагнитные, пожарные требования, показывающие условия работы персонала и разработчика устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во время выполнения выпускной квалификационной работы были рассмотрены магнитные характеристики магнитных материалов. Была проведена классификация магнитотвердых материалов. Были установлены необходимые значения полей, для того чтобы намагнитить материалы до насыщения.

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. Экспериментально была определена величина амплитуды одиночного импульса. Также была разработана схема проверки конденсаторов. Получены экспериментальные характеристики установки.

В ходе работы были разобраны принципы магнитной неустойчивости, выяснены ее причины, описано как избежать неустойчивости путем размагничивания. Было выявлено, что частичное размагничивание уменьшает необратимые изменения во времени и влияние внешних магнитных полей на магнит или изделие. Была разработана структурная схема установки для размагничивания и представлена схема индуктора, а также произведен расчет индуктора, получено расчетное значение тока. Проанализированы формы импульсов при разных параметрах емкостной батареи и индуктивности индуктора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ 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 нанoeлектроника" 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> (дата обращения: 10.03.2017).
5. Пат. 2392681 Российская Федерация, МПК H01F 13/00 (2006.01). Способ косоугольного 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. Макаров Д. А. Исследование частичного размагничивания высокоэнергетических постоянных магнитов в импульсных полях и разработка автоматизированного оборудования для его реализации [Текст]: автореф. дис. на со-

- иск. учен. степ. канд. техн. наук (05.09.03) / Макаров Дмитрий Алексеевич; ФГОУ ВПО Чув. Гос. унив. им. И. Н. Ульянова Чебоксары, 2006. – 22 с.
26. 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.
27. Янке Е. Специальные функции. Формулы, графики, таблицы / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Леш; пер. с нем. под ред. Седова Л.И. – М.: Наука, 1977.
28. Шимони К. Теоретическая электротехника / Карой Шимони. – М.: Мир, 1964. – 773 с.
29. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / Пер. с англ. Г. Кнопфель. – М.: Мир, 1972.
30. 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.
31. Безопасность жизнедеятельности в дипломных проектах: учебное пособие / В.Н. Бекасова, С.И. Боровик, Н.В. Глотова и др.; под ред. И.С. Окраинской. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 166 с.
32. Вопросы обеспечения безопасности в выпускных квалификационных работах / сост.: Блажко Н. В., Буканин В. А., Демидович О. В., Иванов А. Н., Маловский А. И., Павлов В. Н., Трусков А. О. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 80 с.
33. СанПиН 2.2.4.3359-16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах, Дата введения: 01.01.2017.