

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Ли Роман Викторович

КУРСОВАЯ РАБОТА

Создание прототипа системы для запекания сердечника

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18304

Научный руководитель:

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Рекомендуется к публикации в сборнике избранных курсовых работ
Научный руководитель
Преподаватель практикума
Куратор практикума

Оглавление.

3.....	Аннотация
4.....	Введение
5.....	Теоретическая часть
7.....	Экспериментальная часть
10.....	Заключение
11.....	Список использованной литературы

Аннотация

Целью работы было исследование подтверждение эффективности использования переменного магнитного поля для нагрева металлических заготовок. Исследование проводилось на установке, включающей в себя катушку, замкнутый сердечник-магнитопровод и датчики температуры. Для получения экспериментальных данных проводились периодические измерения температуры при постоянных амплитуде и частоте входного напряжения. На основании полученных данных был сделан вывод об оптимальных параметрах генератора и магнитопровода для внутреннего выделения тепла с оптимальной скоростью. Исследуемый метод нагрева предлагается использовать для процесса контролируемого склеивания массива металлических пластин с помощью термического клея.

Введение.

В данной работе исследуется явление выделения тепла в проводнике-ферромагнетике, помещённом в переменное магнитное поле. Как известно, при изменении внешнего магнитного поля в подобной среде происходит два процесса с выделением тепла: перемагничивание и возникновение индукционных токов. Данные процессы предлагается использовать для внутреннего нагрева сердечника, выполненного в форме замкнутого квадрата, состоящего из тонких листов трансформаторного железа. Работа направлена на выявление оптимального соотношения параметров для требуемых характеристик процесса.

Результаты данной работы предполагается использовать при создании установки для изготовления заготовок для элементов шихтованных магнитопроводов, соединённых с помощью термоклей. Нагрев заготовки магнитным полем позволит отказаться от использования печей и обеспечит непосредственный доступ к заготовке с возможностью коррекции геометрии с помощью сервоприводов с обратной связью.

Физические основы нагрева сердечника переменным магнитным полем хорошо изучены. Благодаря этому существует широкий класс программного обеспечения, позволяющего моделировать электромагнитные и тепловые явления и подходящего для решения рассматриваемой задачи. Для задания приблизительных параметров данной установки была использована среда OPERA-3d.

Задачей работы являлась проверка эффективности предложенного метода нагрева и выявление оптимальных параметров системы, при которых применение данного метода оказалось бы целесообразным в рамках производства. Для этого система была смоделирована в программной среде OPERA-3d, где были получены значения плотности тока в катушке при величине магнитного поля, необходимого для соответствующего нагрева.

Далее с учётом результатов моделирования была создана установка, на которой расчёты были подтверждены экспериментально.

Теоретическая часть.

В установке, рассмотренной в данной работе, магнитное поле создаётся соленоидом с переменным током, установленном вокруг сердечника. Так как сердечник изготовлен из ферромагнитного материала ($\mu \sim 10^3$), отклонение от идеального потока магнитного поля в нём при удалении от центра соленоида низки по сравнению с его величиной. [1]

К тепловыделению в сердечнике наибольший и доминирующий вклад вносят процессы перемагничивания и вихревых токов. [2] Перемагничивание - процесс перераспределения доменных границ в ферромагнетике и роста одних доменов за счёт других, что, с одной стороны, препятствует росту магнитного поля, а с другой - приводит к значительным потерям на тепло [3].

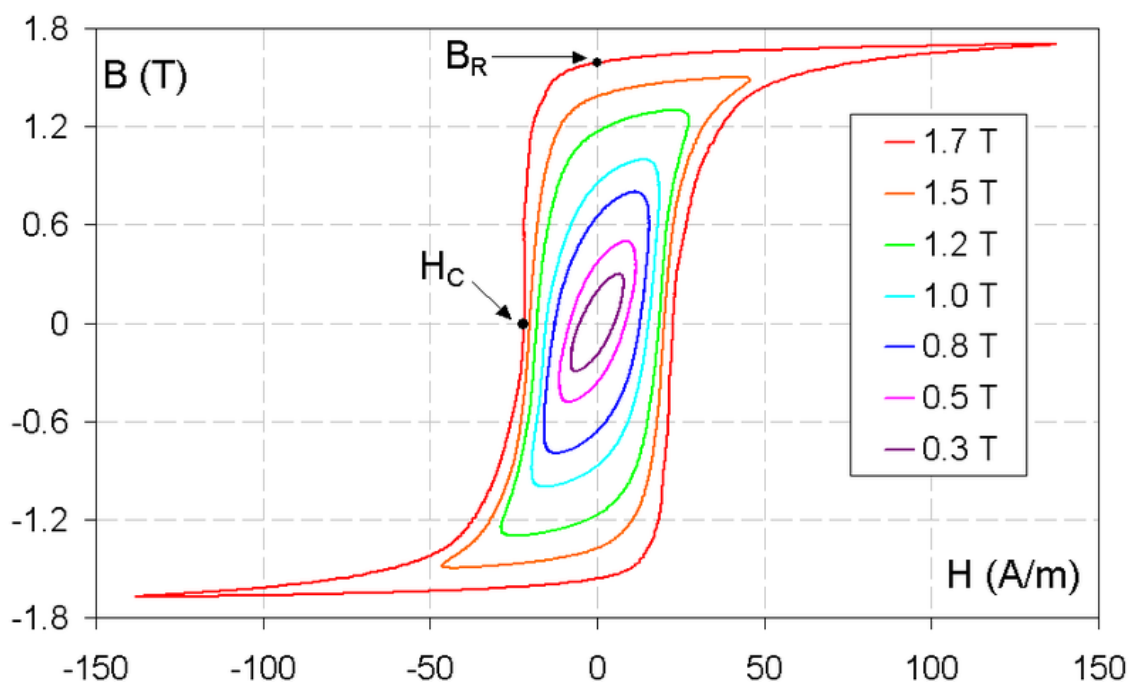


Рисунок 1. Семейство гистерезисных петель для текстурованной электротехнической стали.

Благодаря эффекту перемагничивания зависимость $B(H)$ имеет нелинейный характер, и график этой зависимости образует так называемую гистерезисную петлю. [3] Площадь этой петли зависит от амплитуды

внешнего магнитного поля и равна по величине количеству энергии, выделяющемуся в единицу времени в единице объёма. [3] Таким образом, увеличение величины амплитуды внешнего магнитного поля приводит к увеличению выделяемой мощности.

Вторым эффектом, влияющим на тепловыделение в условиях внешнего переменного магнитного поля являются вихревые токи. Как известно из закона индукции Фарадея, ЭДС индукции ε [4]:

$$\varepsilon = -\frac{1}{c} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (1)$$

Вихревые токи возникают в проводниках под действием данной ЭДС и текут по поверхности проводника в соответствующем направлении [4]. Чтобы сделать выделение тепла более равномерным, в рассмотренной в данной работе установке сердечник был выполнен из тонких слоёв металла, разделённых диэлектриком; таким образом, поверхностные слои оказывались в том числе и в толще сердечника, тем самым заставляя вихревые токи распределяться равномерно по всему сечению. Мощность тепловыделения в данном процессе выражается законом Джоуля-Ленца, прямо пропорциональна среднему квадрату величины вихревых токов и обратно пропорциональна проводимости материала. Таким образом, увеличение величины амплитуды внешнего магнитного поля приводит к увеличению выделяемой мощности.

Выражение для амплитуды тока I_0 в соленоиде [4]:

$$I_0 = \frac{U_0}{|X|} \sim \frac{U_0}{\omega L} \sim \frac{U_0 l}{\omega N^2 S} \quad (2)$$

Отсюда амплитуда магнитного поля H_0 [4]:

$$H_0 \sim \frac{U_0 l}{\omega N S} \quad (3)$$

Таким образом, амплитуду магнитного поля в соленоиде можно менять, изменяя амплитуду и частоту входного напряжения.

Экспериментальная часть.

Экспериментальная установка состоит из магнитопровода и катушки, на которую подавалось переменное напряжение в 220 В частотой 50 Гц. Качественная схема и фотография установки приведена на Рисунке 2.

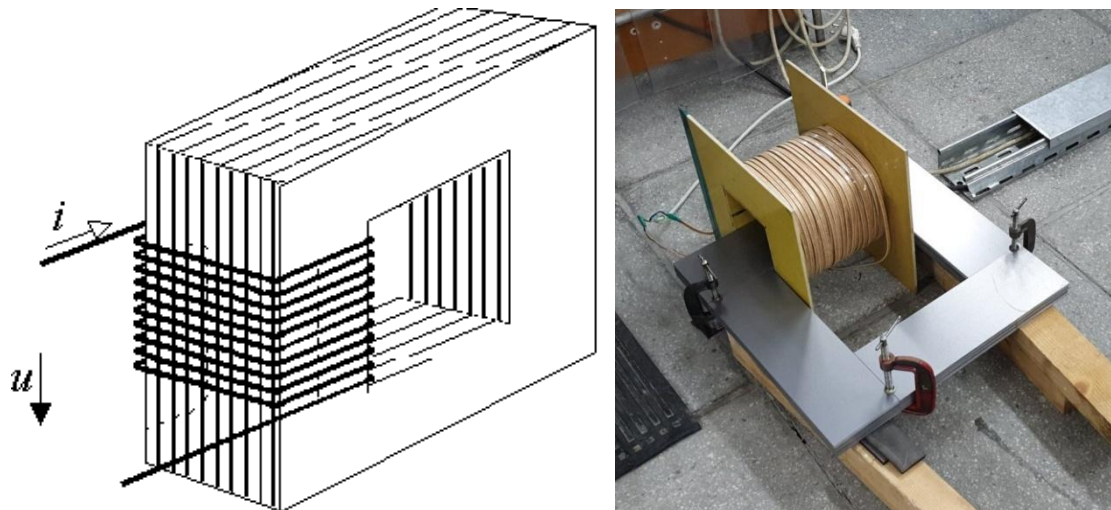


Рисунок 2. Качественная схема и фотография экспериментальной установки.

Длина катушки составляла 17,5 см, сторона квадрата площади сечения равна 11,5 см, количество витков равно 162. Намотка выполнена медной шиной 2×6 мм. Длина внешней стороны квадратного магнитопровода - 40 см, внутренней - 20 см, толщина одного слоя - 1 мм, количество слоёв - 45, суммарная толщина - 4,5 см. Магнитопровод выполнен из стали М1200-100А.

Порядок параметров установки был определён с помощью среды моделирования OPERA-3d. Из заданных размеров катушки и магнитопровода плотность постоянного тока в катушке была подобрана так, чтобы магнитное поле в дальней точке магнитопровода было порядка 2 Тл. Таким образом было показано, что плотность тока в катушке должна быть порядка 1000 А/см². Иллюстрация моделирования приведена на Рисунке 3.

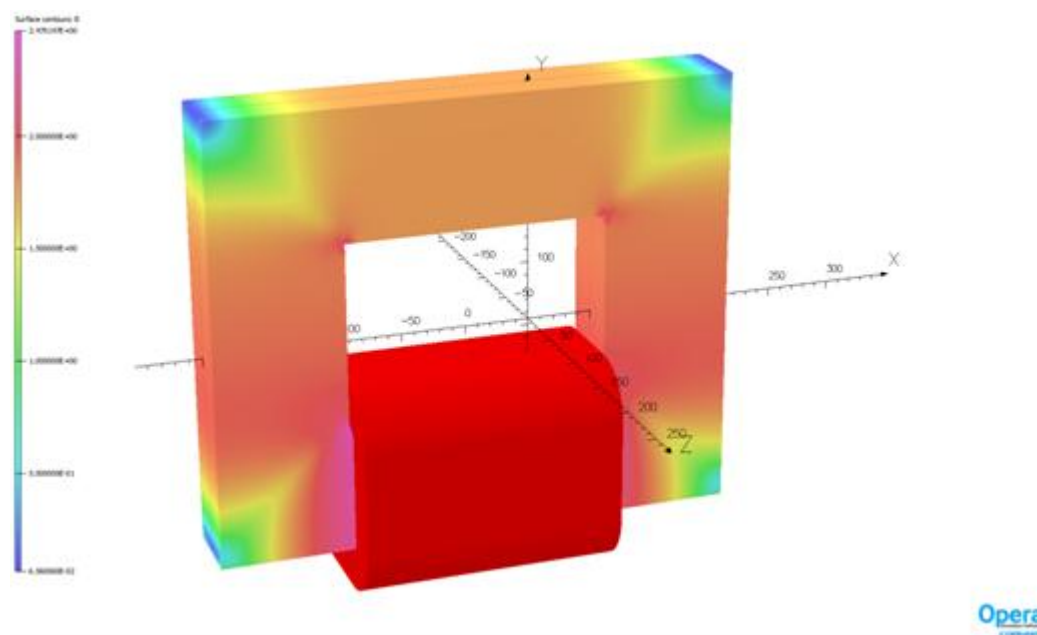


Рисунок 3. Модель распределения магнитного поля в сердечнике.

После подачи рабочего напряжения и на протяжении всего эксперимента измерялось время, за которое температура сердечника в его дальней от катушки точке изменится на один градус Цельсия. Измерения тока проводились с помощью токоизмерительных клещей, измерения температуры - с помощью термопары и мультиметра DT-830C. Данные измерений при токе 4 А приведены в таблице.

t, c	T, °C	t, c	T, °C	t, c	T, °C
52	26	683	35	1380	44
116	27	755	36	1470	45
182	28	820	37	1565	46
232	29	930	38	1650	47
311	30	995	39	1740	48
390	31	1065	40	1825	49
449	32	1150	41	1915	50
526	33	1225	42	2010	51
595	34	1305	43	2095	52

Таблица 1. Данные измерений эксперимента.

По экспериментальным данным была получена зависимость температуры от времени, график которой вместе с его линейной аппроксимацией представлен на Рисунке 4.

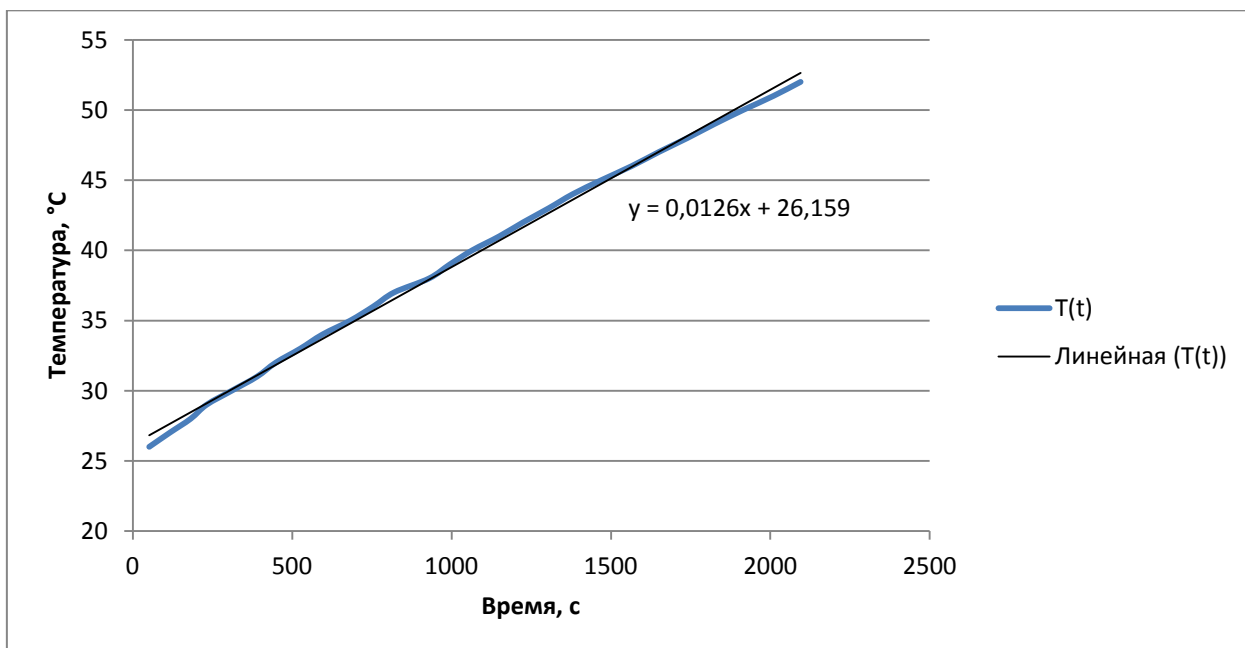


Рисунок 4. Зависимость температуры образца от времени.

Таким образом, можно заключить, что при должной термоизоляции установка подобного типа при переменном напряжении 220 В на частоте 50 Гц с катушкой, содержащей ~150 витков, нагреет сердечник объемом 5400 см³ до температуры запекания 170°C за

$$t = \frac{170 - 26,15}{0,012} = 11\,988 \text{ с} = 3,33 \text{ ч},$$

что приемлемо для применения подобного типа установки на производстве заготовок для квадрупольных линз. Плотность мощности выделения тепла в измеряемой точке P :

$$P = c\rho \frac{\delta T}{\delta t} = 7,874 * 460 * 10^4 * 0,012 = 434,6 * 10^3 \frac{\text{эрг}}{\text{с}}$$

Заключение.

В ходе данной работы был получен ряд применительно важных результатов. Во-первых, была доказана целесообразность использования переменного магнитного поля в качестве нагревательной системы для создания и поддержания в достаточно термоизолированном образце необходимой для запекания термоклей температуры. Во-вторых, было выявлено соотношение основных параметров системы, таких как входное напряжение, индуктивность катушки и размер магнитопровода. Данная работа по изучению свойств прототипа в перспективе послужит основой для разработки полномасштабной промышленной системы на его основе.

Список использованной литературы.

[1] en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_core

[2] ru.wikipedia.org/wiki/Трансформатор

[3] ru.wikipedia.org/wiki/Гистерезис

[4] Яковлев В. И. - Классическая электродинамика: Учеб. Пособие. - Новосибирск: НГУ, 2003. - 267с.