

**XXXII Областная конференция учащихся муниципальных образовательных учреждений города Калуги, посвященной памяти А.Л. Чижевского**

Творческий проект  
Физика

**«Индукционный нагрев»**

Выполнил:  
Шешуков Станислав Павлович  
Учащийся 11 класса

МБОУ СОШ №46 Калужская область г. Калуга

Руководитель:  
Иванова Татьяна Анатольевна  
Учитель физики  
МБОУ СОШ №46 Калужская область г. Калуга

**Калуга, 2021**

<b>ПАСПОРТ ПРОЕКТА</b>	
1. Тема	Бесконтактная передача тепла. Индукционный нагрев.
2. Исполнитель проекта	Шешуков Станислав, ученик 11 «А» класса
3. Куратор проекта	Иванова Т. А.
4. Актуальность	В наше время на МКС часто проводят эксперименты с бесконтактным нагревом и плавкой металла, но на космической станции нельзя использовать открытое пламя.
5. Проблема (-ы)	В наше время мало устройств для передачи тепла без использования открытого пламени.
6. Гипотеза / образ (ожидаемый результат) / цели	Нагрев электропроводящих материалов возможен без использования горючих материалов для передачи тепла.
7. Задачи/шаги	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Изучение информации по теме: «Индукционный нагрев»</li> <li>2. Спроектировать устройство для индукционного нагрева металлов в космосе</li> <li>3. Изготовить устройство</li> <li>4. Протестировать работу устройство.</li> </ol>
8. Предмет проектной деятельности	Двухтактный индукционный нагреватель металлов.
9. Ресурсы	<p>Технические: компьютер, паяльная станция, олово, паяльный жир, канифоль, необходимые радиодетали.</p> <p>Информационные: интернет ресурсы для проектирования схемы, обучения работы с паяльником</p>
10. Индикаторы	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Проектирование схемы</li> <li>2. Изготовление устройства</li> <li>3. Проверка устройства</li> </ol>
11. Рефлексия Достижения/не достижения результатов	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Проектирование схемы</li> <li>2. Изготовление устройства</li> <li>3. Проверка устройства</li> </ol>

## **ВВЕДЕНИЕ**

В наше время на МКС часто проводят эксперименты с бесконтактным нагревом и плавкой металла, но на космической станции нельзя использовать открытое пламя. Мы не можем проводить эксперименты по плавке металлов, так как большинство нагревателей использует горючие материалы, поэтому я решил создать устройство, которое сможет совершать нагрев электропроводящих материалов в космосе без использования горючих материалов.

**Цель работы:** изготовить модель двухтактного индукционного нагревателя

**Задачи исследования:**

1. Изучить информацию по заявленной теме.
2. Подобрать и использовать для исследования данные в сети Интернет.
3. Собрать устройство для бесконтактного нагрева электропроводящих материалов токами высокой частоты и большой величины.
4. Провести эксперименты.

**Гипотеза:** нагрев электропроводящих материалов возможен без использования горючих материалов для передачи тепла.

**Объект исследования:** процесс бесконтактного нагрева электропроводящих материалов.

**Предмет исследования:** индукционный нагрев в космосе.

## ЧАСТЬ 1

### ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ

Метод бесконтактного нагрева электропроводящих материалов токами высокой частоты и большой величины.

Открытие электромагнитной индукции в 1831 году принадлежит Майклу Фарадею. При движении проводника в поле магнита в нём наводится ЭДС, так же как при движении магнита, силовые линии которого пересекают проводящий контур. Ток в контуре называется индукционным. На законе электромагнитной индукции основаны изобретения множества устройств, в том числе определяющих — генераторов и трансформаторов, вырабатывающих и распределяющих электрическую энергию, что является фундаментальной основой всей электротехнической промышленности.

В 1841 году Джеймс Джоуль сформулировал оценку теплового действия тока: «Работа сил электрического поля по перемещению заряда на однородном участке цепи целиком выделяется в виде» (закон Джоуля-Ленца). Тепловое действие индуцированного тока породило поиски устройств бесконтактного нагрева металлов. Первые опыты по нагреву стали с использованием индукционного тока были сделаны Е. Колби в США.

Первая успешно работающая тигельная печь для плавки металлов была построена в 1900 году в Швеции. Печь питалась от однофазного трансформатора. Плавка осуществлялось в тигле в виде кольца, металл, находящийся в нём, представлял обмотку трансформатора, питающегося током 50-60 Гц.

Индукционный нагрев — это нагревание материалов электрическими токами, которые индуцируются переменным магнитным полем. Следовательно — это нагрев изделий из проводящих материалов (проводников) магнитным полем индукторов (источников переменного магнитного поля).

Индукционный нагрев проводится следующим образом. Проводящая (металлическая, графитовая) заготовка помещается в индуктор, представляющий собой один или несколько витков провода (чаще всего медного). В индукторе с помощью специального генератора наводятся мощные токи различной частоты, до нескольких МГц, в результате чего вокруг индуктора возникает электромагнитное поле. Электромагнитное поле наводит в заготовке вихревые токи. Вихревые токи разогревают заготовку под действием Джоулева тепла.

Система «индуктор» представляет собой трансформатор, в котором индуктор является первичной обмоткой. Заготовка является обмоткой, замкнутой накоротко. Магнитный поток между обмотками замыкается в воздухе.

На высокой частоте вихревые токи вытесняются образованным ими же магнитным полем в тонкие поверхностные слои заготовки  $\Delta$  (скин-эффект), в результате чего их плотность резко возрастает, и заготовка разогревается. Нижерасположенные слои металла прогреваются за счёт теплопроводности. Важен не ток, а большая плотность тока. В скин-слое  $\Delta$  плотность тока увеличивается в  $e$  раз относительно плотности тока в заготовке, при этом в скин-слое выделяется 86,4 % тепла от общего тепловыделения. Глубина скин-слоя зависит от частоты излучения: чем выше частота, тем тоньше скин-слой. Также она зависит от относительной магнитной проницаемости  $\mu$  материала заготовки.

Для железа, кобальта, никеля и магнитных сплавов при температуре ниже точки Кюри  $\mu$  имеет величину от нескольких сотен до десятков тысяч. Для остальных материалов (расплавы, цветные металлы, жидкие легкоплавкие эвтектики, графит, электропроводящая керамика и т. д.)  $\mu$  примерно равна единице.

Индуктор сильно нагревается во время работы, так как сам поглощает собственное излучение. К тому же он поглощает тепловое излучение от

раскалённой заготовки. Делают индукторы из медных трубок, охлаждаемых водой. Вода подаётся отсасыванием — этим обеспечивается безопасность в случае прожога или иной разгерметизации индуктора.

### **Список источников и использованной литературы**

1. Бабат Г. И., Свенчанский А. Д. Электрические промышленные печи. — М.: Госэнергоиздат, 1948. — 332 с.
2. Бурак Я. И. Огирко И. В. Оптимальный нагрев цилиндрической оболочки с зависящими от температуры характеристиками материала // Мат. методы и физ.-мех. поля. — 1977. — В. 5.с.50-54
3. Слухоцкий А. Е. Индукторы. — Л.: Машиностроение, 1989. — (Библиотечка высокочастотника-термиста; Вып. 12). с.12-18.
4. Фогель А. А. Индукционный метод удержания жидких металлов во взвешенном состоянии / Под ред. А. Н. Шамова. — 2-е изд., испр. — Л.: Машиностроение, 1989. — 79 с. — (Библиотечка высокочастотника-термиста; Вып. 11).

## ПРИМЕНЕНИЕ

1. Сверхчистая бесконтактная плавка, пайка и сварка металла.
2. Получение опытных образцов сплавов.
3. Гибка и термообработка деталей машин.
4. Ювелирное дело.
5. Обработка мелких деталей, которые могут повредиться при газопламенном или дуговом нагреве.
6. Поверхностная закалка.
7. Закалка и термообработка деталей сложной формы.
8. Обеззараживание медицинского инструмента.
9. Высокоскоростной разогрев или плавление любого электропроводящего материала.
10. Возможен нагрев в атмосфере защитного газа, в окислительной (или восстановительной) среде, в жидкости, в вакууме.
11. Нагрев через стенки защитной камеры, изготовленной из стекла, цемента, пластмасс, дерева — эти материалы очень слабо поглощают электромагнитное излучение и остаются холодными при работе установки. Нагревается только проводящий материал — металл (в том числе расплавленный), углерод, проводящая керамика, жидкие металлы и т. п., например, внутренности радиолампы можно прогревать для обезгаживания прямо через стеклянную колбу. Электролиты (растворы солей) невозможно нагревать индукционным нагревом, так как ионы обладают большой массой и малой подвижностью.

За счёт возникающих МГД-усилий происходит сильное перемешивание жидкого металла, вплоть до удержания его в подвешенном состоянии в воздухе или защитном газе — так получают сверхчистые сплавы в небольших количествах (левитационная плавка, плавка в электромагнитном Тигиле).

Поскольку, разогрев ведётся посредством магнитного излучения, отсутствует загрязнение заготовки продуктами горения факела в случае

газопламенного нагрева или материалом электрода в случае дугового нагрева. Помещение образцов в атмосферу благородного газа и большая скорость нагрева позволят избавиться от окалинообразования.

Нет загрязнения воздуха, так как отсутствуют продукты горения. Небольшие установки индукционного нагрева можно использовать в замкнутом и в не проветриваемом помещении, не оборудованном средствами вентиляции и вытяжками (гаражи, небольшие домашние мастерские, подвалы).

Удобство эксплуатации за счёт небольшого размера индуктора.

Можно изготовить индуктор особой формы — это позволит одинаково прогревать всю поверхности детали сложной конфигурации, не приводя к их короблению или локальному не прогреву.

Легко провести локальный и избирательный нагрев.

Так как наиболее интенсивно разогрев идет в малых верхних слоях заготовки, а нижние слоигреваются более медленно за счёт теплопроводности, метод является идеальным для проведения поверхностной закалки деталей (сердцевина детали при этом остаётся вязкой).

Лёгкая автоматизация оборудования и конвейерных производственных линий. Простота управления циклами нагрева и охлаждения. Простая регулировка и удерживание температуры, стабилизация мощности, подача и съём заготовок.

Недостатки:

Большая сложность оборудования, необходим квалифицированный персонал для проектирования установок, их настройки и ремонта.

При плохом согласовании индуктора с заготовкой требуется большая мощность на нагрев, чем в случае применения для той же задачи ТЭНов, электрических дуг и электронагревательных спиралей.

Требуется мощный источник электроэнергии для питания установки индукционного нагрева, а также насос и бак с охлаждающей жидкостью для



охлаждения индуктора (чиллер), которые в полевых условиях могут отсутствовать. В этом случае применение, например, газовых горелок с портативными газовыми баллонами более оправдано.

Несмотря на маленькие размеры индуктора, устройство индукционного нагрева в целом достаточно громоздок и больше подходит для установки в помещении, чем для работ вне.

### **Список источников и использованной литературы**

1. Применение токов высокой частоты в электротермии / Под ред. А. Е. Слухоцкого. — Л.: Машиностроение, 1968.с.46-60.
2. Лозинский М. Г. Промышленное применение индукционного нагрева. — М.: Изд-во АН СССР, 1948.с.25-32.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

На рисунке 2.1 изображена схема индукционного нагревателя.

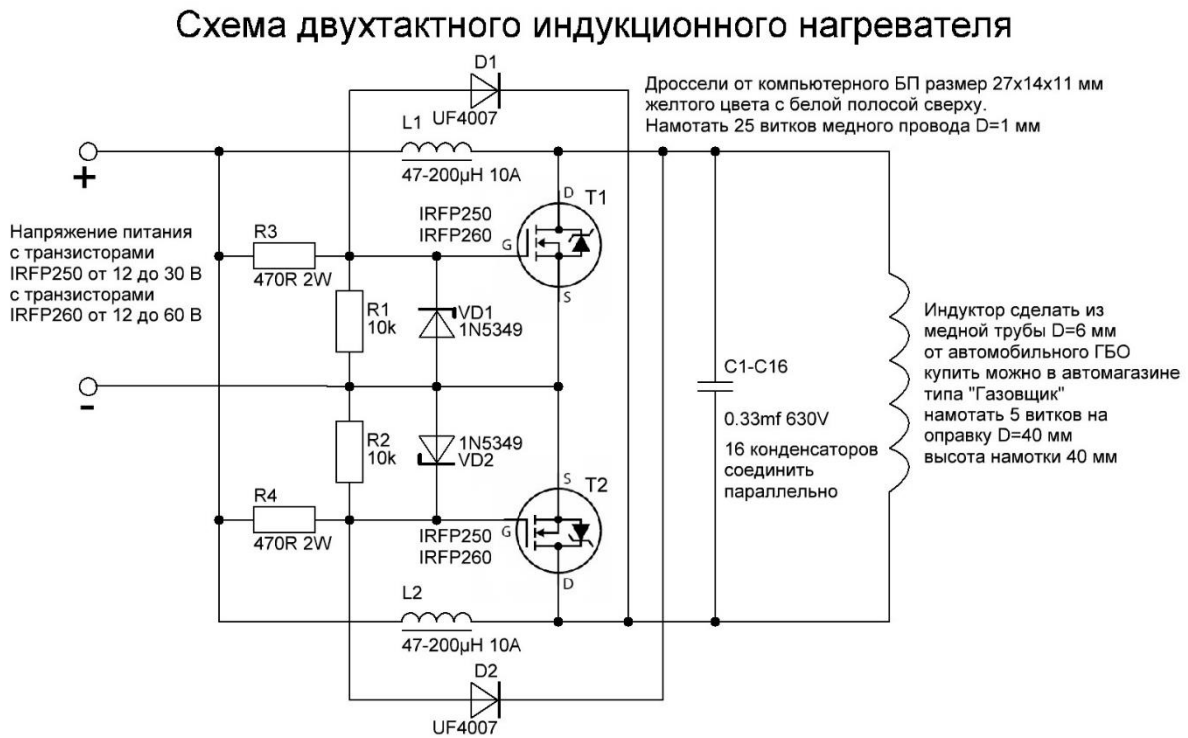


Рисунок 2.1

Характеристики транзистора IRFP260:

Наименование прибора: IRFP260

Тип транзистора: MOSFET

Полярность: N

Максимальная рассеиваемая мощность: 280 Вт

Предельно допустимое напряжение сток-исток: 200 В

Предельно допустимое напряжение затвор-исток: 10 В

Максимально допустимый постоянный ток стока: 46 А

Сопротивление сток-исток открытого транзистора: 0.055 Ом

Особенности:

- Потребление тока: менее  $10\text{ В} \geq 5\text{ А}$ , выше  $12\text{ В} \geq 10\text{ А}$
- Минимум внешних элементов

Двухтактный индукционный нагреватель состоит из задающего генератора высокой частоты, собранного на двух мощных полевых транзисторах. Рабочее напряжение генератора зависит от мощности установленных полевых транзисторов. С транзисторами IRFP260 устройство можно питать напряжением от 12 до 60 вольт. Температура нагрева металла поднимается более 800 градусов, что даст возможность плавить металлы. В процессе работы транзисторы будут сильно нагреваться, поэтому их я установил на большие радиаторы. Индуктор потребляет в рабочем состоянии не менее 15А, соответственно требуется очень мощный аккумулятор минимум на 20А.

На рисунке 2,2 изображена печатная плата индукционного нагревателя по которой я буду делать свой проект.

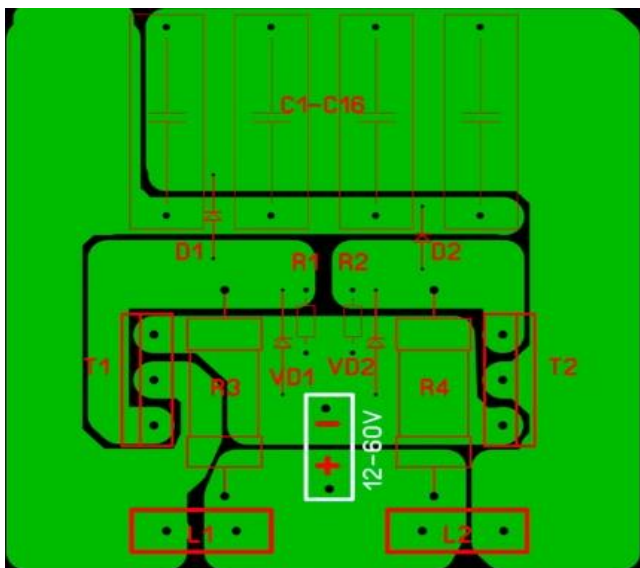


Рисунок 2.2

Так же мне понадобятся резисторы на 10 кОм, 0.25 Ватт. Резисторы с сопротивлением 470 Ом. Диоды ультрабыстрые UF4007 на наибольший ток до 1А. Стабилитроны мощностью 5 Вт с напряжением стабилизации 12В, например, 1N5349 или их аналоги. Дроссели размером 27x14x11 мм желтого цвета, с белой полосой которые я купил в магазине радиотехники. На каждый дросселей я намотал 25 витков медной проволоки в лаковой изоляции диаметром 1 мм. Индуктивность дросселей при проверке на измерителе RLC получилась 67мкГн. Фото дросселей приведено на рисунке 2.3.



*Рисунок 2.3*

После того как я намотал дроссели я приступил к параллельному соединению 4 конденсаторов 0.56 мкФ. Для хорошего охлаждения между конденсаторами я оставил небольшое расстояние. Далее я приступил к изготовке индуктора, его я сделал из медной проволоки длиной 1 м и диаметром 2 мм. Я намотал трубку на ПВХ трубу внешним диаметром 40 мм, сделав 5 витков так чтобы между верхним краем первого витка и нижним краем пятого витка было 40 мм. Когда индуктор был готов, в магазине радиодеталей я купил одностороннюю печатную плату. С помощью паяльника я снял слой меди, тем самым сделав изоляцию между нужными мне частями платы и просверлил отверстия диаметром 1 мм так как показано на рисунке печатной платы

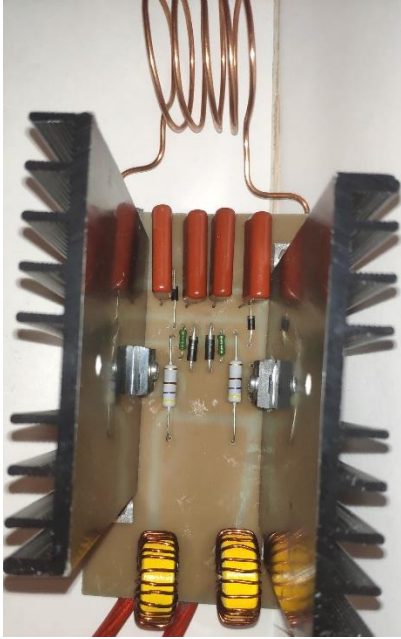
индукционного нагревателя, также я усилил проводящую сторону платы слоем олова, для того чтобы маленький слой меди, нанесенный на плату, не сгорел от сильных токов. Затем я припаял индуктор к плате. Фото приведено на рисунке 2.4.



Далее я приступил к пайке радиодеталей на плату (важно учесть, что

*Рисунок 2.4*

радиодетали не должны паяться на проводах наличие проводов в плате приведет к взрыву одного из транзисторов). Также после пайки на плате я закрепил два радиатора, на которые при использовании теплопроводящей пасты КПТ-8 прикрутил транзисторы. Фото приведены на рисунке 2.5.



*Рисунок 2.5*

После подключения устройства к автомобильному аккумулятору 12В произошёл бесконтактный нагрев заготовки.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате проведённой работы я изготовил экспериментальный двухтактный нагреватель работы с электропроводящими материалами в космосе. Устройство оказалось рабочим, и смогло осуществить бесконтактный нагрев токопроводящих металлов. Из результатов проведённого мною анкетирования можно судить о том, что для людей, метод бесконтактного нагрева токопроводящих металлов очень интересен и они хотели бы досконально его изучить. Подводя итог моей работы, я могу сказать, что гипотеза моего проекта: нагрев электропроводящих материалов возможен без горючих материалов для передачи тепла, при этом оно будет обладать не очень большим КПД, и будет выполнять нужную задачу, подтвердилась. Можно с уверенностью сказать, что в ближайшее время именно индукционные нагреватели в процессе непосредственного развития станут одной из основополагающих отраслей в будущем изучения и освоения космоса.

**Приложение.**  
**Смета на расходы**

Транзисторы IRFP260 2 шт. -529 руб.

Резисторы 10K 0.25W 2 шт. -160 руб.

Резисторы 470R 2W 2 шт. -245.

Диоды ультрабыстрые UF4007 2 шт. -325 руб.

Стабилитроны на 12V 1W 1N5349 2 шт.-98 руб.

Конденсаторы C1-C16 0.33mf 630V 4 шт. 146 руб.

Дроссели от компьютерного БП желтые с белой полосой, размер 27x14x11 мм 2 шт. 420 руб.

Провод медный в лаковой изоляции d=2 мм длина 1 метр- 120 руб.

Радиатор 1 шт.- 460 руб.

Итого: 2383 руб.

Цена в магазине: 35600 руб.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабат Г. И., Свенчанский А. Д. Электрические промышленные печи. — М.: Госэнергоиздат, 1948.
2. Бурак Я. И. Огирко И. В. Оптимальный нагрев цилиндрической оболочки с зависящими от температуры характеристиками материала // Мат. методы и физ.-мех. поля. — 1977. — В. 5.
3. Васильев А. С. Ламповые генераторы для высокочастотного нагрева. — Л.: Машиностроение, 1990. — 80 с. — (Библиотечка высокочастотника-термиста; Вып. 15).
4. Власов В. Ф. Курс радиотехники. — М.: Госэнергоиздат, 1962.
5. Изюмов Н. М., Линде Д. П. Основы радиотехники. — М.: Госэнергоиздат, 1959.
6. Лозинский М. Г. Промышленное применение индукционного нагрева. — М.: Изд-во АН СССР, 1948.
7. Применение токов высокой частоты в электротермии / Под ред. А. Е. Слухоцкого. — Л.: Машиностроение, 1968.
8. Слухоцкий А. Е. Индукторы. — Л.: Машиностроение, 1989. — (Библиотечка высокочастотника-термиста; Вып. 12).
9. Фогель А. А. Индукционный метод удержания жидких металлов во взвешенном состоянии / Под ред. А. Н. Шамова. — 2-е изд., испр. — Л.: Машиностроение, 1989. — 79 с. — (Библиотечка высокочастотника-термиста; Вып. 11).
10. Мякишев. Физика 10 класс. Учебник. Базовый и углублённый уровни.
11. <https://web.archive.org/web/20120410235016/http://www.icct.ru/Practicality/Papers/05-07-2010/Invertor-02.php>