

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники
(институт)

Кафедра «Промышленная электроника»

11.03.04 Электроника и наноэлектроника
(код и наименование направления подготовки, специальности)

промышленная электроника
направленность (профиль)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему МАКЕТ УСТАНОВКИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Студент(ка)	<u>А.А. Гадалин</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Руководитель	<u>А.В. Прядилов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Консультанты	_____	_____	(личная подпись)
	_____	_____	(личная подпись)

Допустить к защите

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

« _____ » _____ 20 _____ г.

Тольятти 2016

Аннотация

Объем 47 с., 34 рис., 1 табл., 20 источников, 0 прил.

ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ, ИНДУКТОР

Объектом исследования являются макет установки индукционного нагрева.

Цель работы: изготовление действующего макета установки индукционного нагрева.

Задачи работы:

1. обзор существующих решений
2. Разработка электрической принципиальной схемы
3. Выбор элементов схемы
4. Математическое моделирование
5. Изготовление макета установки
6. Отладка макета
7. Экспериментальные исследования

Работа состоит из четырех глав, в которых решены упомянутые задачи.

Для расчета и моделирования режимов работы индуктора использовался программный пакет Elcut 5.1. Математические расчеты проводились с использованием пакета MathCad 15.

Степень внедрения: создан действующий макет установки индукционного нагрева.

Областью применения данной работы являются технологии, требующие нагрева ферромагнитных или неферромагнитных металлических заготовок.

На данный момент времени созданный макет установки используется в качестве демонстрационного пособия при обучении студентов и пропагандационных мероприятий со школьниками. С участием макета отснят цикл видеороликов, агитирующих к поступлению в ТГУ.

Содержание

Аннотация	2
Содержание.....	3
Введение	4
1. Состояние вопроса.....	5
1.1. Формулирование актуальности, цели и задач проекта	5
1.2. Обзор существующих решений	6
2. Расчетная часть	11
2.1. Разработка электрической принципиальной схемы.....	11
2.2. Выбор элементов схемы	14
3. Математическое моделирование	21
4. Экспериментальная часть.....	29
4.1. Изготовление макета установки	29
4.2. Отладка макета	31
4.3. Экспериментальные исследования	32
Заключение	45
Список литературы	46

Введение

Индукционный нагрев – это процесс нагрева металлической (как правило, ферромагнитной) заготовки посредством возбуждаемых в ней вихревых токов, создаваемых быстро изменяющимся магнитным полем [1]. Такое магнитное поле создается индуктором (как правило, выполненным в форме соленоида), по которому протекает переменный ток. Для увеличения эффективности работы установки последовательно или параллельно индуктору добавляется емкость, создающая вместе с индуктивностью индуктора последовательный или параллельный резонансный контур. Использование резонанса позволяет значительно увеличить скорость изменения магнитного поля за счет перекачки энергии из поля индуктора в конденсатор и обратно, минуя систему питания. Задачей системы питания является добавление энергии в колебательный контур синхронно с колебаниями в нем.

В рамках данной работы предполагается разработать, создать и отладить небольшую действующую модель установки индукционного нагрева. Такая модель позволит практически изучить данный процесс, а так же может быть использована в качестве демонстрационного пособия на выставках и при агитации абитуриентов.

1. Состояние вопроса

1.1. Формулирование актуальности, цели и задач проекта

Индукционный нагрев широко используется для нагрева металлических (как правило, ферромагнитных) заготовок. В основном это стали (сплавы железа, других металлов и добавок). Индукционный нагрев – это самый эффективный способ передачи электрической энергии в металл без гальванического контакта. И от его эффективности будет зависеть общая эффективность всего производственного процесса. Исходя из вышесказанного, разработка установок индукционного нагрева является актуальной задачей.

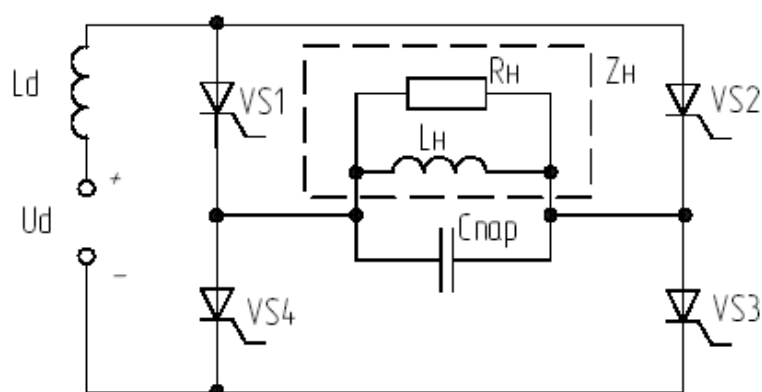
Целью данной работы является: изготовление действующего макета установки индукционного нагрева.

Для достижения этой цели поставлены и выполнены следующие **задачи**:

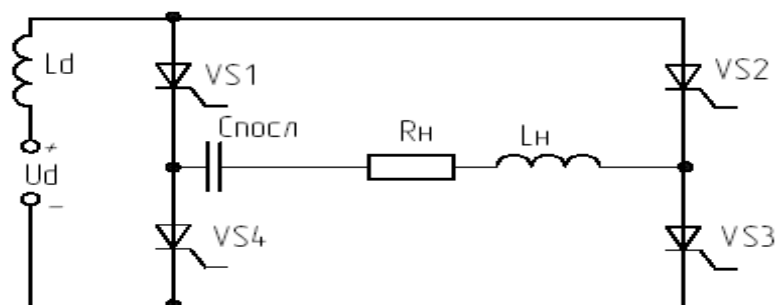
1. Обзор существующих решений
2. Разработка электрической принципиальной схемы
3. Выбор элементов схемы
4. Математическое моделирование
5. Изготовление макета установки
6. Отладка макета
7. Экспериментальные исследования

1.2. Обзор существующих решений

В промышленности используются мощные инверторы, построенные на тиристорных схемах. Тиристоры – это наиболее надежные управляемые полупроводниковые приборы, имеющие максимальное соотношение мощность/стоимость. Для дополнительного увеличения эффективности системы используются резонансные режимы. Например, параллельный резонанс (рис.1.1а) или последовательный резонанс (рис. 1.1б).



а) с параллельным резонансом.



б) с последовательным резонансом

Рис. 1.1. – Схемы на тиристорах

Разумеется, для управления тиристорами необходима система управления (рис1.2) [2].

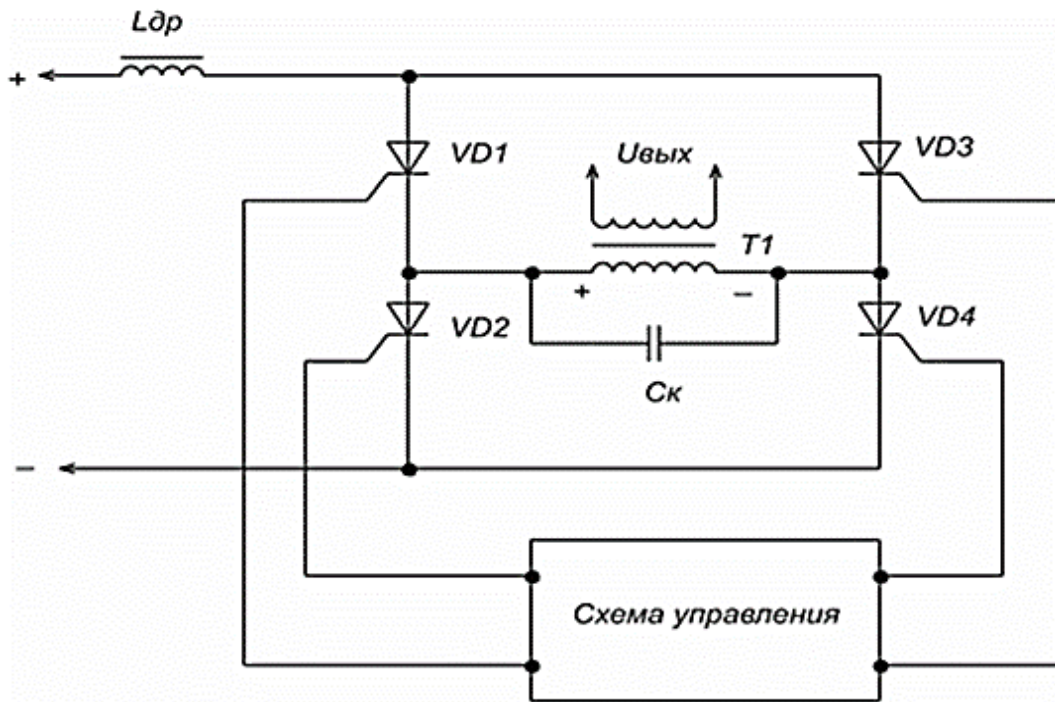


Рис. 1.2 Схема инвертора на тиристорах

Однако тиристор – это полу управляемый полупроводниковый ключ. Он открывается сигналом управления, а закрывается только обратным напряжением. Для небольшого макета установки рассмотрим схемы на полностью управляемых элементах – транзисторах.

Выбор типа резонанса.

Последовательный резонанс позволяет увеличить напряжение на индукторе, а параллельный – ток. Обычно ток индукторов довольно велик и для уменьшения токов в схеме выберем параллельный резонанс.

Итак, рассмотрим схемотехнические решения для индукционного нагрева, построенные на транзисторах с реализованным параллельным резонансом [4,5]. Например, схема по рис. 1.3 подразумевает дополнительный модуль управления. В качестве ключей $K1$ и $K2$ применяются транзисторы. Управлять нижним ключом довольно просто – необходимый потенциал базы (затвора) отсчитывается относительно нижнего вывода транзистора (эмиттера). Особую проблему может

представлять сложность управления верхним ключом, т.к. потенциал нижней точки транзистора не привязан к земле (прыгает) в пределах от нуля до напряжения питания. Данная проблема решается при помощи специальных драйверов.

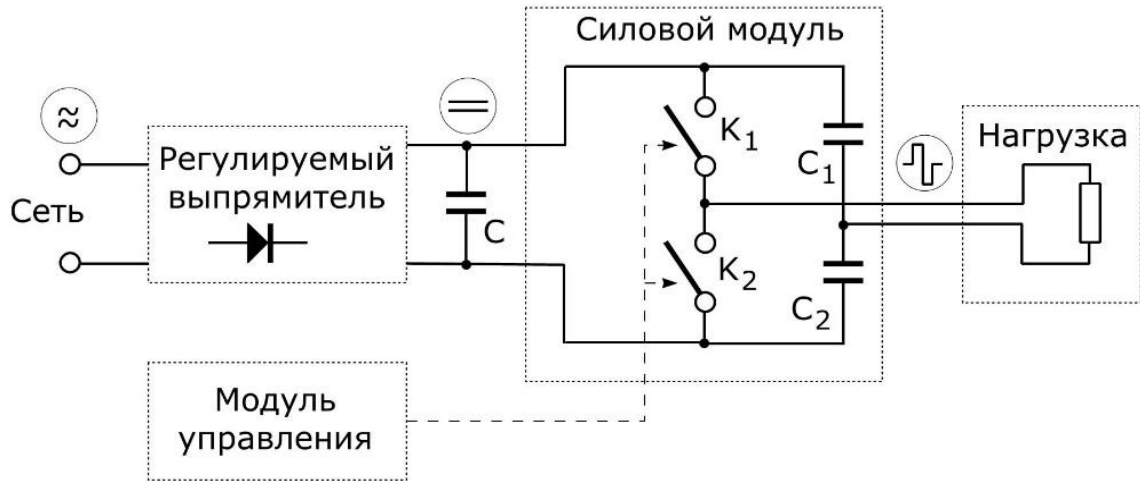


Рис. 1.3 – Схема инвертора для индукционного нагрева на транзисторах.

Существуют еще похожие схемы на транзисторах

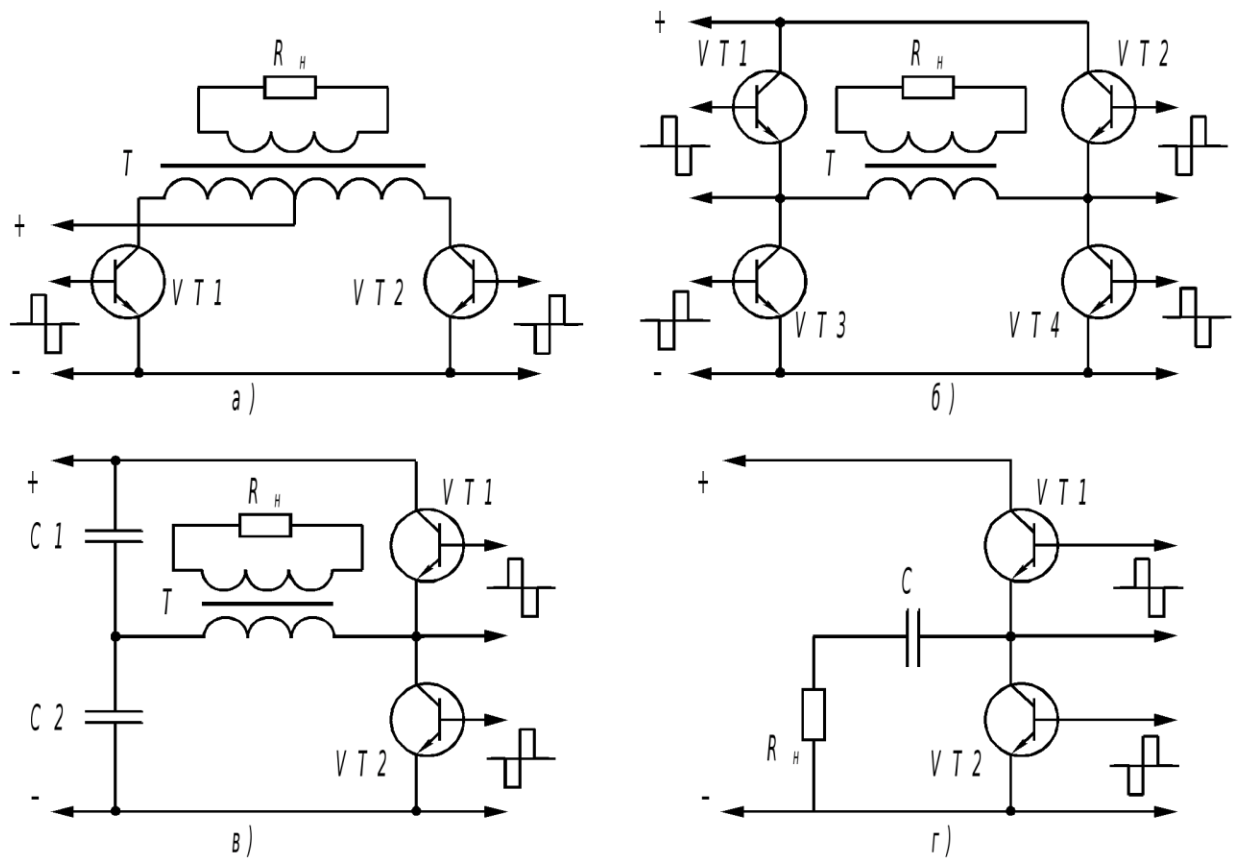


Рис. 1.4 - Схемы инверторов на транзисторах

Возможно использование трансформаторной передачи сигналов управления на транзисторы (рис. 1.5). <http://www.radio-magic.ru/high-voltage/93-indukzionniji-nagrev>

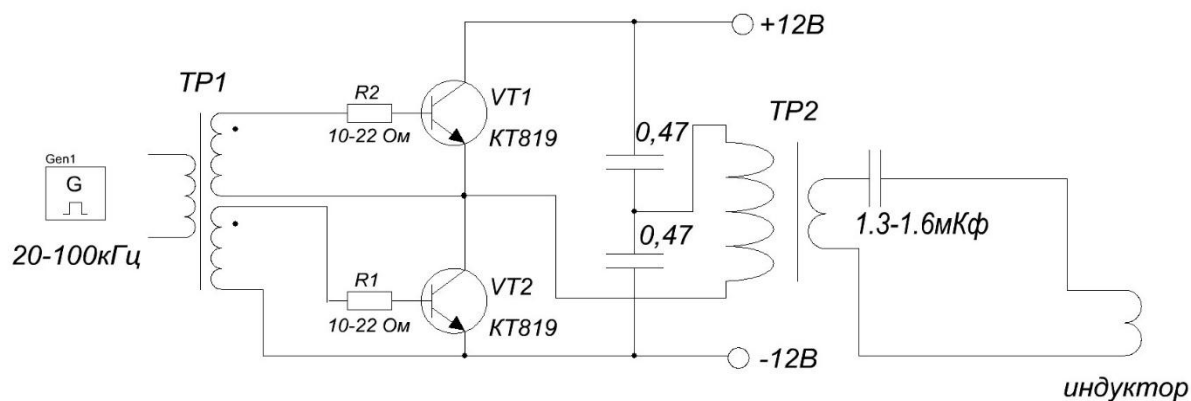


Рис. 1.5 – Схема инвертора с трансформаторной передачей сигнала управления на транзисторы

Однако и это не всегда удобно, требует изготовления трансформатора. Попробуем найти бестрансформаторную схему для инвертора. Существует схема (рис. 1.5) [3]

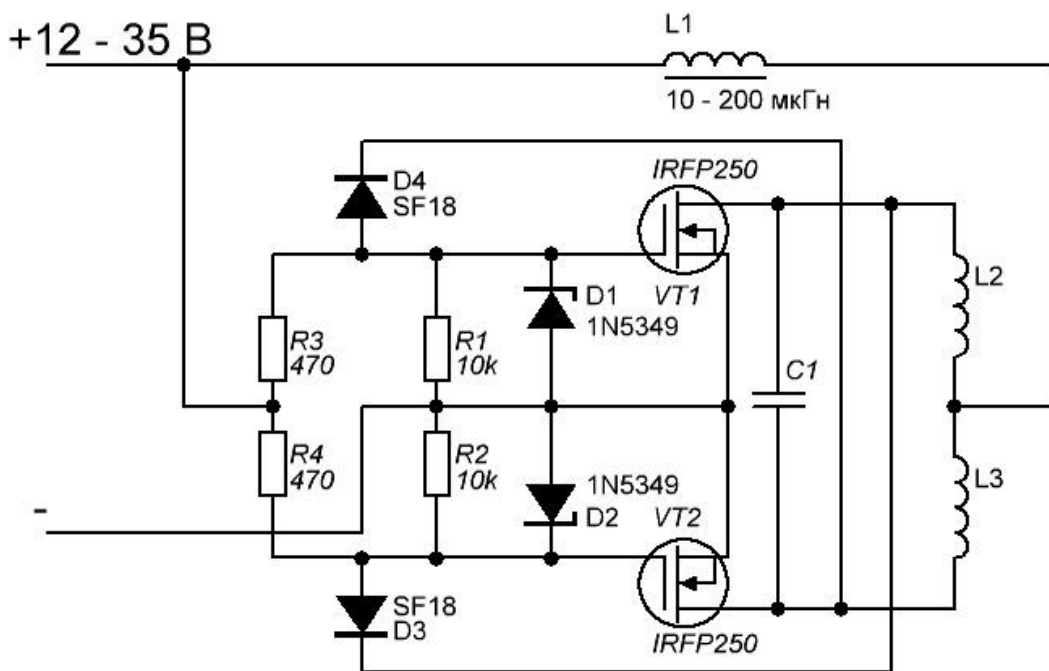


Рис. .1.5 – Бестрансформаторная схема инвертора со средней точкой.

Однако эта схема имеет сложную конструкцию индуктора L1, L2 с отводом от средней точки. Что неудобно и может создать сложности в связи с неидеальной взаимной индуктивностью ее полуобмоток.

Ее можно преобразовать, избавившись от среднего вывода. При этом потребуется изготовление двух дросселей, что несложно. Именно такую схему и возьмем за основу в данном проекте.

2. Расчетная часть

2.1. Разработка электрической принципиальной схемы

Электрическая принципиальная схема, разработанная в данной главе, изображена на рис. 2.1. Отличие от схемы по рис. 1.5 заключается в двух дросселях L1, L2 вместо одной, что позволило упростить конструкцию индуктора (обойтись без средней точки). Разработанная схема (рис.2.1.) работает согласно диаграммам (рис. 2.2) следующим образом:

Источником управляющих сигналов для транзисторов является сам колебательный контур индуктор L – конденсаторы C. В процессе работы происходит их колебательный перезаряд, синхронно с которым в контур добавляется энергия от источника питания +12В. До момента t_0 транзистор VT1 был открыт и в дросселе L1 протекал ток, «разгоняясь» по цепи +12В – Rш1 – L1 – VT1 – GND. В момент времени t_0 конденсатор C контура начинает заряжаться (слева +, справа -) током, протекающим по индуктору (справа на лево). В результате начинает закрываться транзистор VT1 (напряжение на его затворе уменьшается) и открываться VT2 (напряжение на его затворе увеличивается). Ток из дросселя L1 поступает в колебательный контур L-C, добавляя в него энергию. В момент t_1 (примерно) напряжение на контуре становится больше напряжения питания, поэтому ток дросселя начинает уменьшаться (t_1-t_2). За это время (t_1-t_2) конденсатор C заряжается (слева +, справа -) и начинает разряжаться обратно на индуктор L (положительная полуволна напряжения $U_C=U_L$ на рис. 2.2.). К моменту t_2 конденсатор оказывается разряженным, а ток в L достигает максимума и протекает в направлении слева направо. В течении t_2-t_3 напряжение на затворе второго транзистора уменьшается (теперь закрывается он), а первого – увеличивается – он открывается. В течении t_3-t_0 формируется вторая (отрицательная) полуволна напряжения на емкости и индукторе. В это

время транзистор VT1 открыт и ток дросселя L1 вновь увеличивается. После момента t_0 процессы повторяются.

Правильность теоретических предпосылок о работе схемы подтверждена результатами экспериментальных исследований.

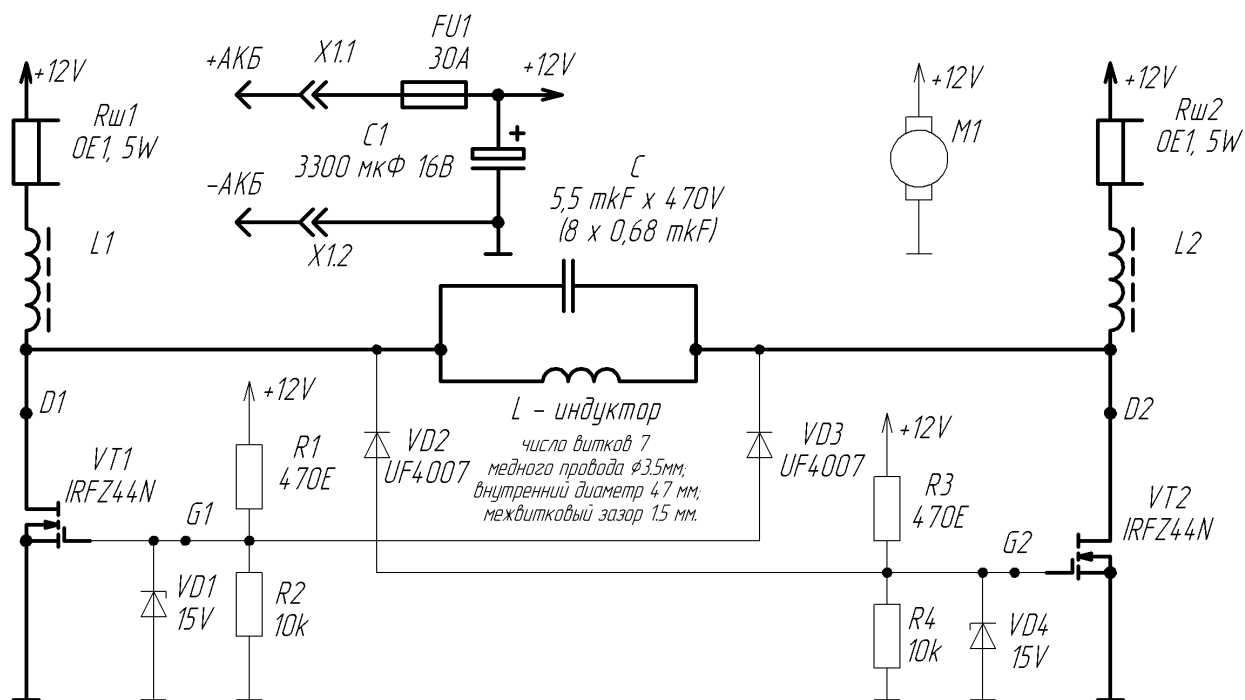


Рис. 2.1. – Принципиальная электрическая схема установки
индукционного нагрева

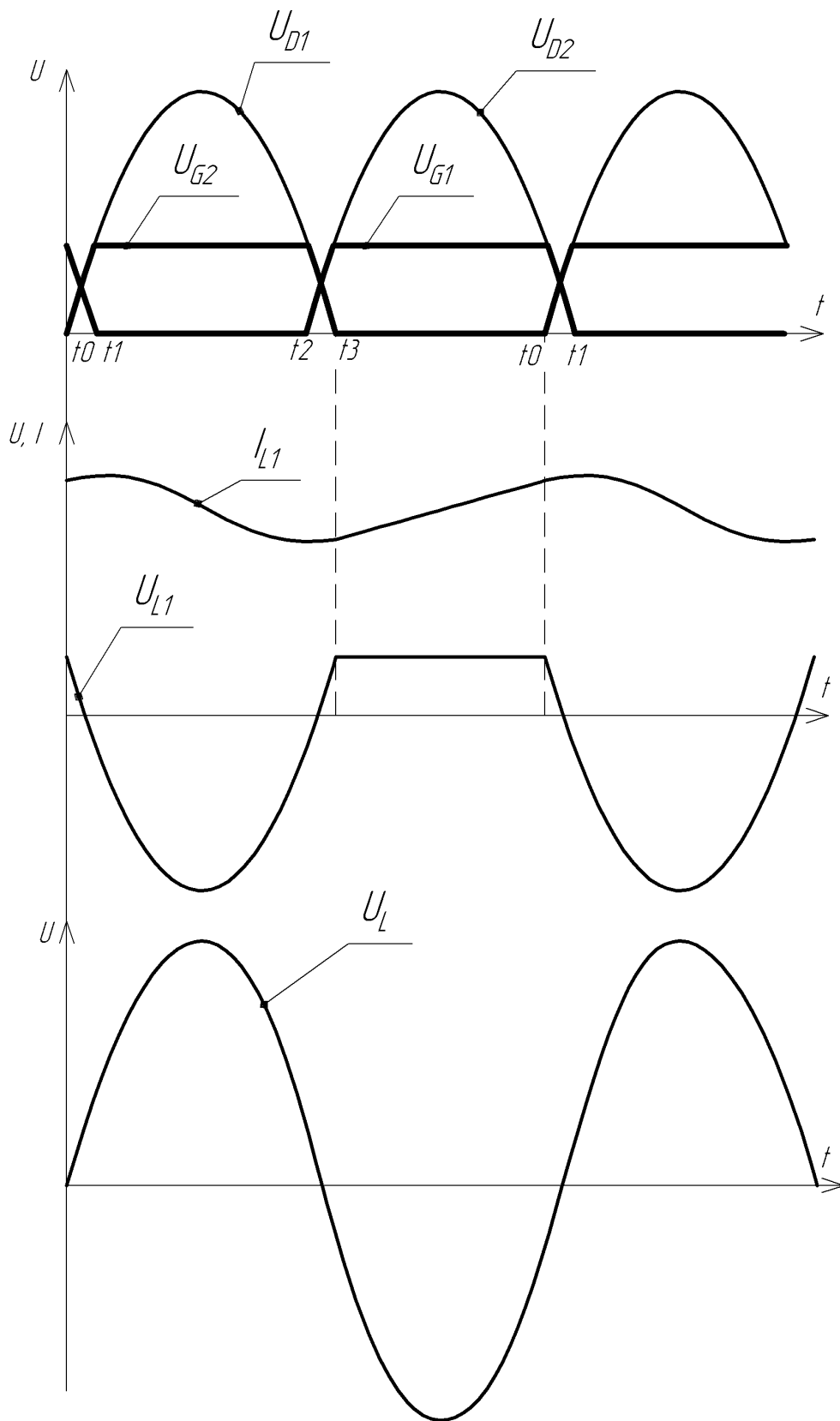


Рисунок 2.2. – Временные диаграммы работы схемы.

2.2. Выбор элементов схемы

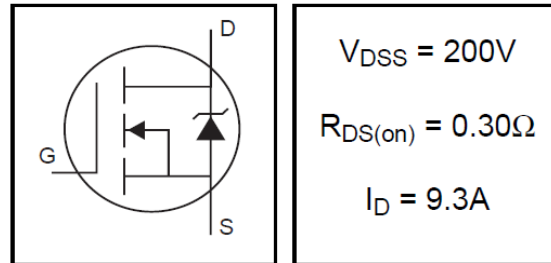
Для выбора элементов использовали информацию, размещенную в сети интернет, в частности на сайтах магазинов электронных компонентов «Платан» и «Чип и дип» [6,7].

Выбор транзисторов.

Выбор элементов схемы начали с выбора транзисторов. Одним из параметров, рассчитать который теоретически не удалось – является добротность колебательного контура. В связи с этим было не ясно, до какого напряжения будет «раскачиваться» напряжение на контуре и соответственно невозможно узнать амплитуду напряжения, на которую должны быть рассчитаны силовые транзисторы. Сначала были куплены транзисторы типа IRF630N (рис. 2.3.), рассчитанные на заведомо большое напряжение 200 В. И только после полной сборки установки и проведения первых экспериментальных исследований была выявлена амплитуда напряжения на транзисторах (она составила 30 В) и в соответствии с ней были выбраны транзисторы типа IRFZ44N (рис. 2.4), рассчитанные на меньшее напряжение (55 В), но зато имеющие гораздо меньшее сопротивление канала в открытом состоянии (17.5 мОм).

- Advanced Process Technology
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements

HEXFET® Power MOSFET



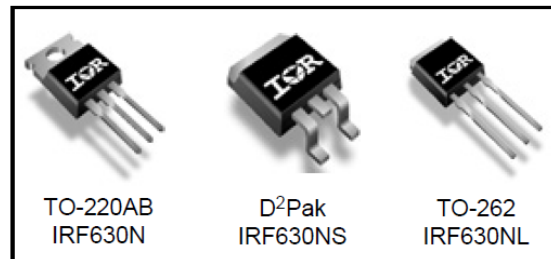
Description

Fifth Generation HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET Power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.

The D²Pak is a surface mount power package capable of accommodating die sizes up to HEX-4. It provides the highest power capability and the lowest possible on-resistance in any existing surface mount package. The D²Pak is suitable for high current applications because of its low internal connection resistance and can dissipate up to 2.0W in a typical surface mount application.

The through-hole version (IRF630NL) is available for low-profile application.



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	9.3	A
$I_D @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	6.5	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	37	
$P_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation	82	W
	Linear Derating Factor	0.5	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②	94	mJ
I_{AR}	Avalanche Current ①	9.3	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ①	8.2	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ⑥	8.1	V/ns
T_J T_{STG}	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +175	°C
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw ④	10 lbf•in (1.1N•m)	

www.irf.com

1

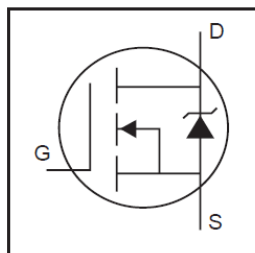
10/11/00

Рис. 2.3 – Справочные данные транзистора IRF630N.

IRFZ44N

HEXFET® Power MOSFET

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated

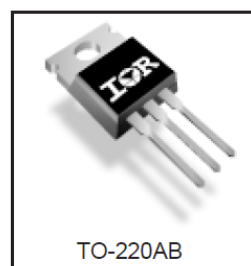


$V_{DSS} = 55V$
$R_{DS(on)} = 17.5m\Omega$
$I_D = 49A$

Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	49	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	35	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	160	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	94	W
	Linear Derating Factor	0.63	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
I_{AR}	Avalanche Current ①	25	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ①	9.4	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	5.0	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to + 175	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds		
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1N•m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	1.5	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

www.irf.com

1
01/03/01

Рис. 2.3 – Справочные данные транзистора IRFZ44N.

Расчет дросселей

Следующим элементом, расчёт которого необходимо произвести, являются дроссели L1,2. Дроссели изготовили на основе сердечников, взятых из неисправного компьютерного блока питания. Маркировка на них отсутствовала, поэтому для определения параметров намотали на них пробное число витков, произвели экспериментальные исследования (сняли осциллограмму тока и напряжения) и далее произвели расчет. На осциллограмме рис.2.4 представлены: первый канал – напряжение на дросселе; второй канал –ток дросселя (сигнал, снимаемый с токоизмерительного шунта $R_{ш1}=0.1$ Ом. Снятие этой осциллограммы производили в режиме холостого хода, запитав установку от стабилизированного источника питания $U=13В$.

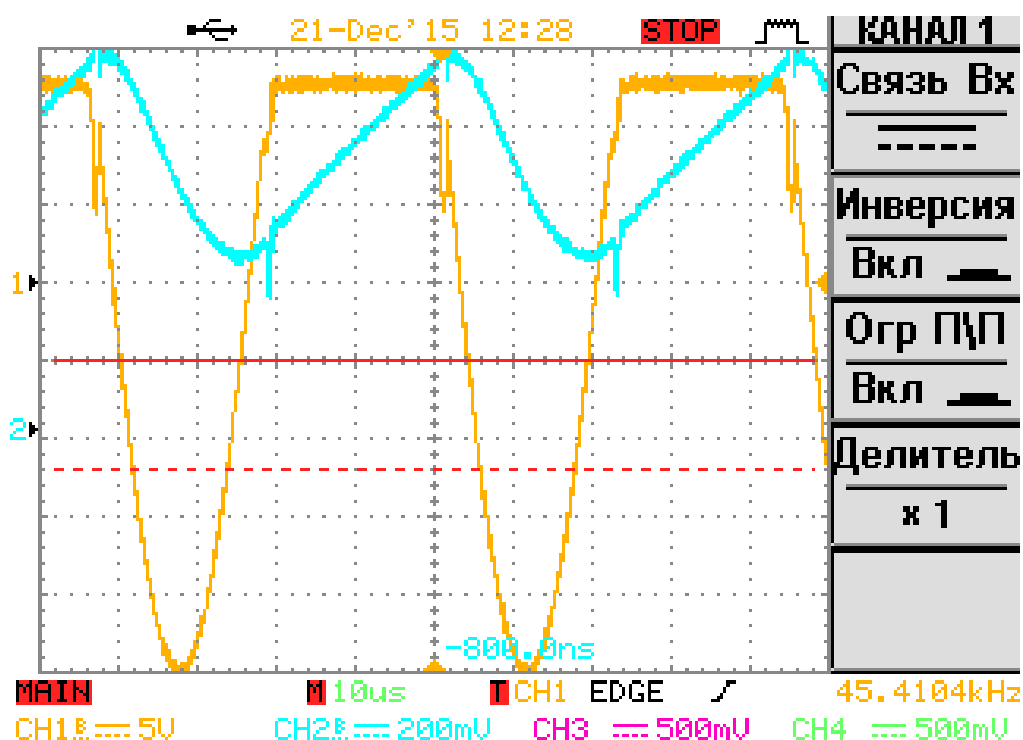


Рис. 2.4. Осциллограмма тока и напряжения на дросселе.

Здесь и далее, что бы не ошибиться в расчетах, все величины будем подставлять в СИ.

Дроссель представляет собой $w=24$ витка провода диаметром 1.5 мм, намотанного на кольцеобразный сердечник с размерами:
 внешний диаметр $D=27$ мм,
 внутренний диаметр $d=14$ мм,
 высота $h=11$ мм.

Длина средней магнитной линии составляет $l_{cp} := \pi \cdot \frac{D+d}{2} = 64.4$ мм

Площадь сечения кольца $S := \frac{D-d}{2} \cdot h = 0.715$ см²

Индуктивность полученного дросселя определили экспериментально по осциллограмме рис. 2.4. При напряжении на дросселе $U=13$ В, за время $t=20$ мкс ток возрастает на $I=4$ А. Вычислим значение индуктивности дросселя

$$L1 = U \cdot t / (I) = 13 \text{ В} \cdot 20 \text{ мкс} / (4 \text{ А}) = 65 \text{ мкГн.} \quad (2.1)$$

Далее нашли среднее значение магнитной проницаемости сердечника

$$\mu := \frac{L}{w^2 \cdot \mu_0} \cdot \frac{l_{cp}}{S} = 80.9 \quad (2.2)$$

Где $\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$

Зная магнитную проницаемость сердечника, и задавшись индукцией насыщения магнитопровода $B_m=0.4$ Тл, нашли ток насыщения дросселя

$$I_m := \frac{B_m \cdot l_{cp}}{\mu \cdot \mu_0 \cdot w} = 10.5 \text{ А} \quad (2.3)$$

При этом в дросселе запасется энергия

$$W_m := \frac{B_m^2 \cdot l_{cp} \cdot S}{2 \cdot \mu \cdot \mu_0} = 3.62 \times 10^{-3} \text{ Дж} \quad (2.5)$$

Выбор индуктора и параллельной ему емкости

Индуктор изготовили из имеющегося в наличии медного провода, намотав его на цилиндр. Полученные геометрические размеры индуктора:

Внутренний диаметр $d_{вн}=47$ мм

Диаметр провода $d_{пр}=3.5\text{мм}$

Расстояние между витками 1.5 мм

Число витков $n=7$

Подробный расчет индуктора приводится в главе 3.

Согласно рекомендациям, приведенных на многих сайтах сети интернет (в т.ч. и в описании схемы рис. 1.5), емкость C было решено изготовить из нескольких емкостей. Для повышения добротности контура и уменьшения нагрева номинальное напряжение емкостей (470В) выбрано многократно превышающим реально ожидаемое напряжение на них (40В). Методом последовательных итераций (использовались различные емкости и проводились экспериментальные исследования) приняли решение составить емкость из 8 конденсаторов по 0.68 мкФ х 470В. В итоге конденсаторная батарея обладает суммарной емкостью $C=8\cdot 0.68\text{ мкФ}=5.5\text{ мкФ}$.

Выбор остальных элементов схемы

Для ограничения напряжения на затворе транзисторов на уровне 15 В, выбрали балластные резисторы $R1, R3=470\text{ Ом}$, стабилитроны $VD1, 2$ на 15 В. Выбор произвели согласно описанию схемы аналога, изображенной на рис.1.5. Стабилитроны выбрали типа КС508Б стекло, как имеющиеся в наличии в магазине. Так же добавили резисторы $R2, 4=10\text{ кОм}$, предназначенные для задания низкого потенциала на базах транзисторов в случае отсутствия резисторов $R1$ и $R3$.

Диоды $VD2, VD3$ выбрали типа UF4007. Это дешевые быстродействующие (ультра-фаст) диоды, рассчитанные на ток 1А. Выбор осуществили согласно описанию к схеме рис. 1.5.

Для защиты схемы в случае короткого замыкания или выхода транзисторов из строя использовали автомобильный предохранитель FU1 на

30 А. Придя в магазин визуально выбрали предохранитель типа S1035-3 30А, как подходящий для впайки в схему.

Для сглаживания напряжение питания использовали электролитический конденсатор С1 (3300 мкф х 16 В).

Для охлаждения конденсаторов индуктора использовали вентилятор на 12 В, извлеченный из компьютерного блока питания.

Для замера токов последовательно с дросселями установили токоизмерительные шунты Rш1, 2 представляющие собой керамические резисторы типа SQP-0.1 Ом, 5 Вт.

Исходя из формулы мощности $P=I^2 \cdot R$ Найдем номинальный ток, на который они рассчитаны

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{5}{0.1}} = 7 \text{ А} \quad (2.6)$$

Т.к. таких резисторов два, то суммарный номинальный ток, потребляемый установкой составит 14А.

Однако в связи с наличием вентилятора, как показали экспериментальные исследования, установка способна работать в форсированном режиме (при больших значениях потребляемого тока). Например, при разогреве шарика потребляемый ток составлял 30 А, что вдвое превышает расчетное значение.

3. Математическое моделирование

Расчет индуктора произведем с помощью программного пакета Elcut, [Прядилов А.В. Автоматизированные расчеты магнитных полей: практикум по дисциплине «Магнитные элементы электронной техники» / А.В. Прядилов, Р.И. Назаров. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2015.]. Целью расчета является получение картины магнитных полей и определение целесообразности использования высокочастотных магнитопроводов (ферритов) для концентрации магнитных полей на заготовке.

Анализ переменного магнитного поля и вихревых токов в заготовке является сложной задачей, поэтому сначала провели моделирование для режима холостого хода (отсутствия заготовки в индукторе). А затем провели моделирование с анализом вихревых токов для шарообразной заготовки (анализ магнитного поля переменных токов). Исходными данными являются геометрические размеры и амплитуда тока индуктора:

Для режима холостого хода исходными данными являлись:

Внутренний диаметр $d_{вн}=47\text{мм}$

Диаметр провода $d_{пр}=3.5\text{мм}$

Расстояние между витками 1.5 мм

Число витков $n=7$

Амплитуда тока $I=100\text{ А}$

Магнитная проницаемость феррита $\mu=1000$

Магнитная проницаемость воздуха и меди $\mu=1000$

Для анализа магнитного поля переменных токов дополнительно понадобились данные:

Удельная проводимость меди: $5.9 \cdot 10^7\text{ См/м}$

Удельная проводимость стали заготовки: $1 \cdot 10^7$ См/м

Магнитная проницаемость стали заготовки $\mu=1000$

Частота тока 50 кГц

Порядок расчета в Elcut выглядит следующим образом:

1. Рисуется геометрия
2. Задаются свойства областям
3. Области разбиваются на зоны (рис.3.1.)
4. Производится решение (рис.3.2)
5. Анализируются результаты (рис.3.3.)

На рис. 3.2 приведена полная рассчитанная картина поля с разбиением на зоны. Поскольку большую часть рисунка занимает поле, расположенное в воздухе вокруг индуктора, то в дальнейшем будем отображать укрупненно только область вокруг индуктора (рис. 3.3.).

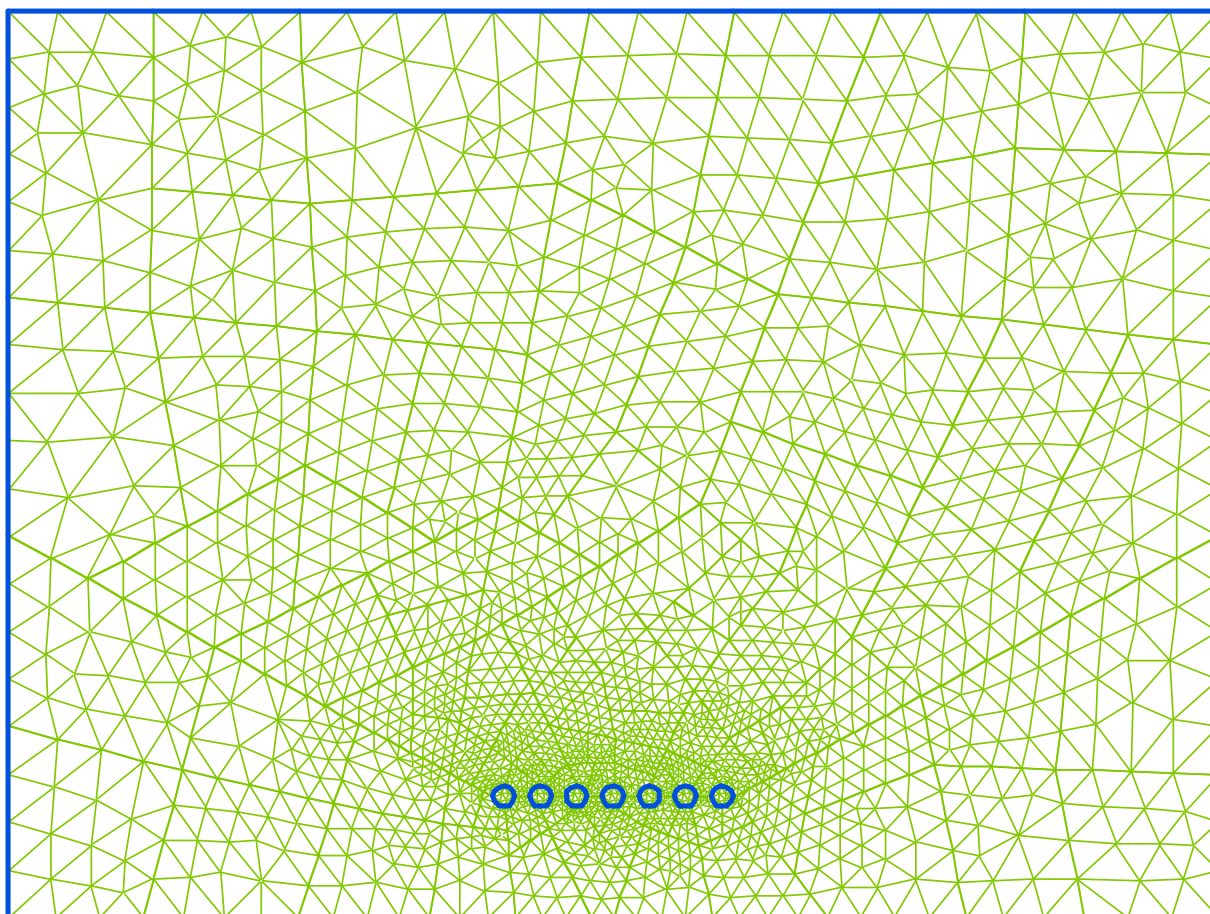


Рис. 3.1 – Геометрия расчетной области с разбиением на зоны.

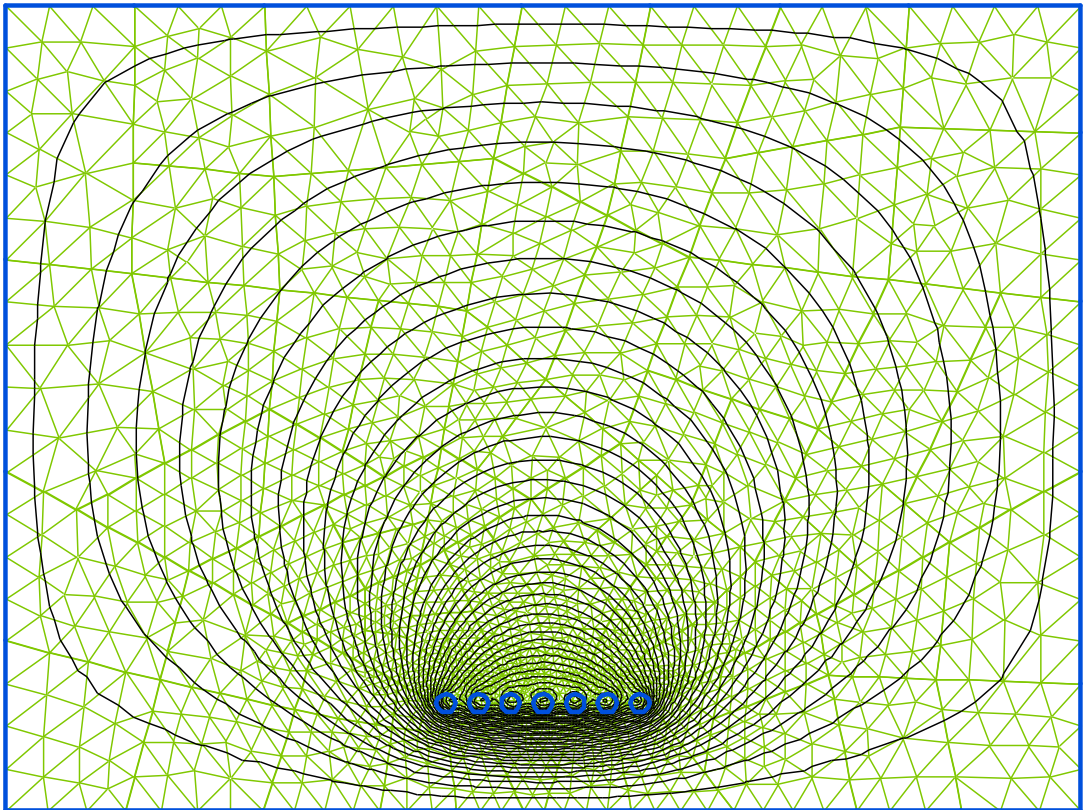


Рис. 3.2 – Полная картина поля с разбиением на зоны.

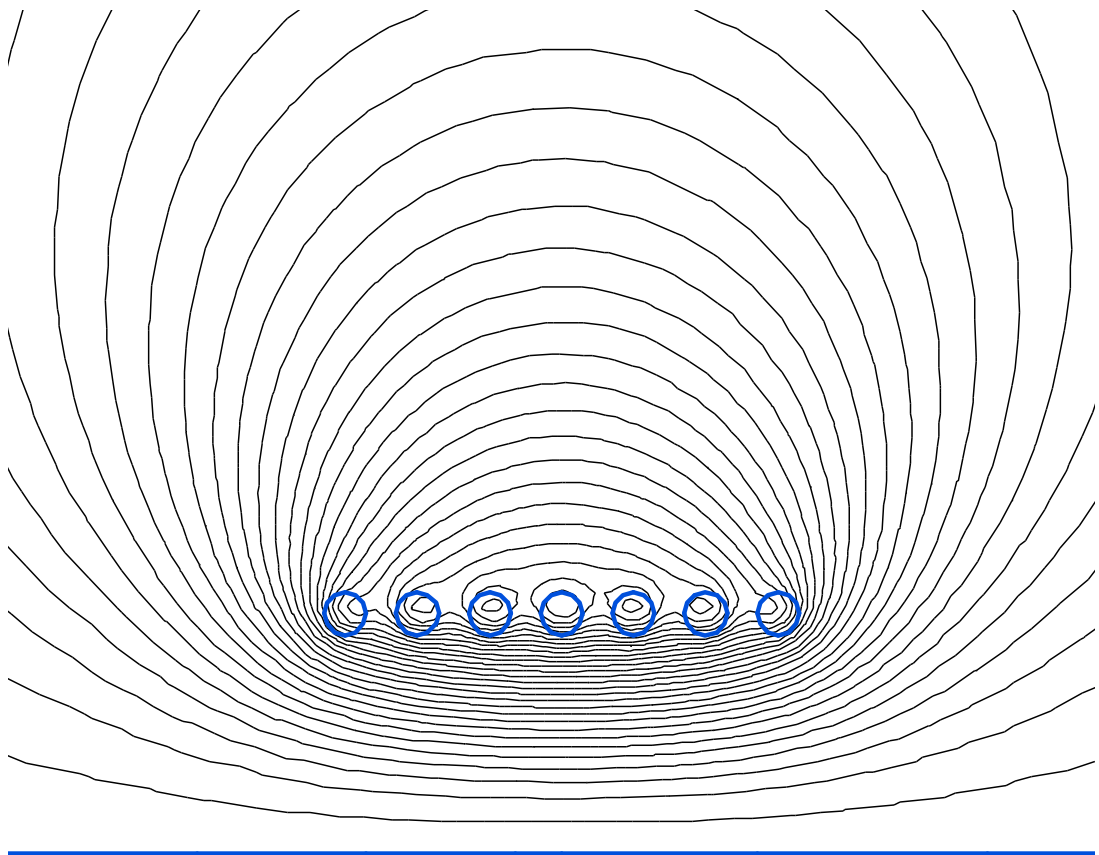


Рис. 3.3. – Картина поля укрупненно

Поскольку в картине моделирования (см. рис. 3.1 – 3.3) отображается только одна (верхняя) половина сечения результата, для лучшего понимания будем отображать их симметрично вниз.

На рис. 3.4 приведена картина поля для статики (режим холостого хода) при отсутствии феррита. Как видно из рис. 3.5, при добавлении феррита индукция в будущем месте расположения заготовки (центр) увеличивается от 15 до 20 мВб, что предположительно может привести к увеличению мощности нагрева. Для проверки этой идеи провели моделирование уже с учетом заготовки и частоты тока. Результаты представлены на рис. 3.6 и 3.7. Из них действительно можно сделать предположенные о возможном повышении эффективности нагрева при добавлении феррита (мощность выделяемого тепла возрастает от 280 до 365 Вт, т.е. фактически на 30%). Однако следует помнить, что моделирование производилось для одной и той-же частоты и одинаковых амплитудах токов, в то время как они наверняка могут измениться при добавлении ферритов в связи с изменившимися параметрами системы.

Более точный ответ на вопрос о целесообразности использования ферритов могло бы дать более сложное математическое моделирование. Однако в связи с его сложностью, оно не входит в состав данного проекта. В рамках проекта предполагается осуществить экспериментальную попытку определения целесообразности применения ферритов (см. главу 4).

Рассчитаем рабочую (резонансную) частоту колебательного контура индуктор-емкость. Индуктивность индуктора (режим х.х., без ферритов) составляет 1.2 мкГн. Емкость (см. рис. 2.1 и п.2.2) равняется 5.5 мкФ. Тогда резонансная частота составит

$$f_{\text{рез}} := \sqrt{\frac{1}{1.2\text{mk} \cdot 5.5\text{mk}}} = 62\text{kHz} \quad (3.1)$$

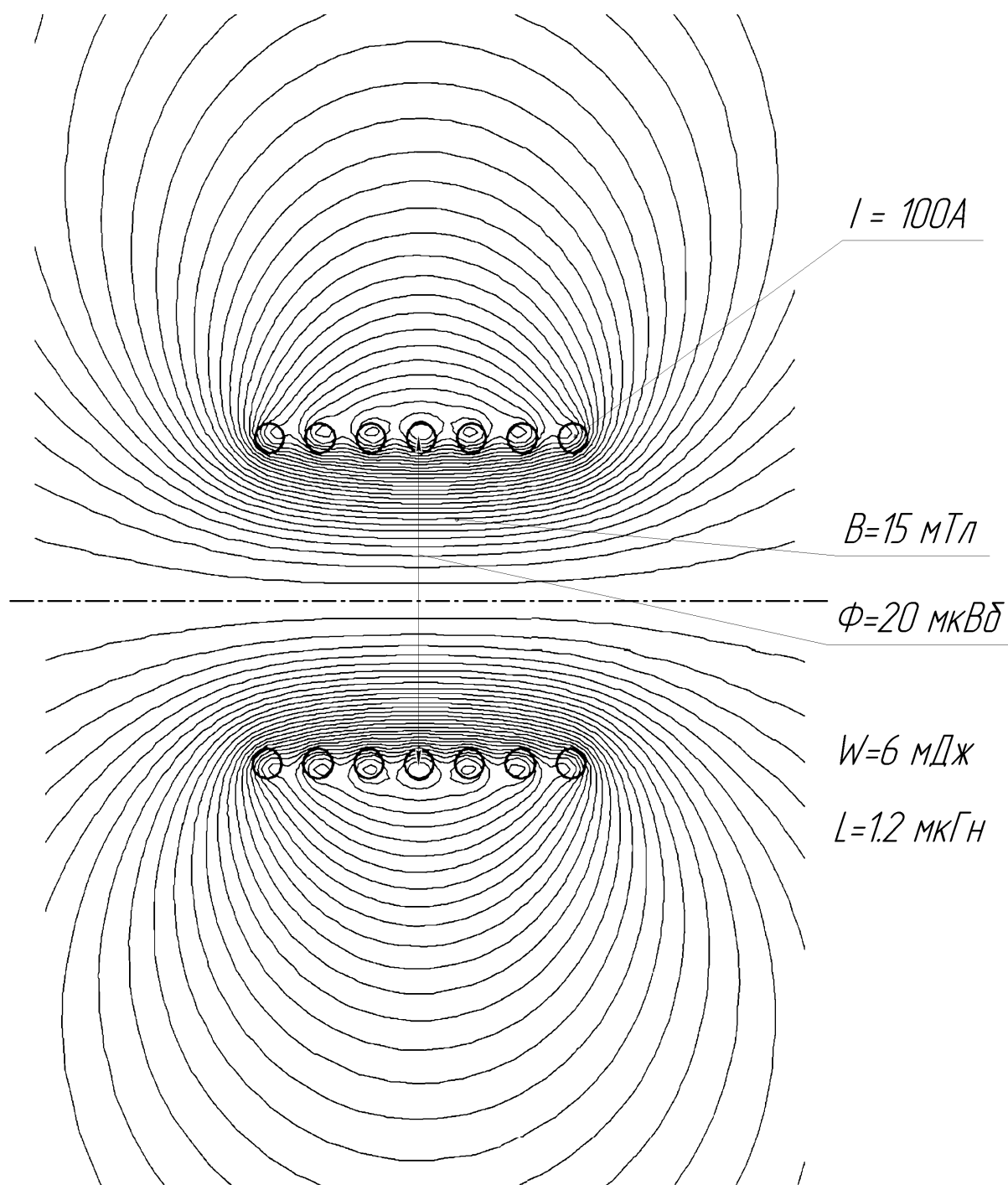


Рис. 3.4. Картина поля для статики (режим холостого хода) при отсутствии ферритов

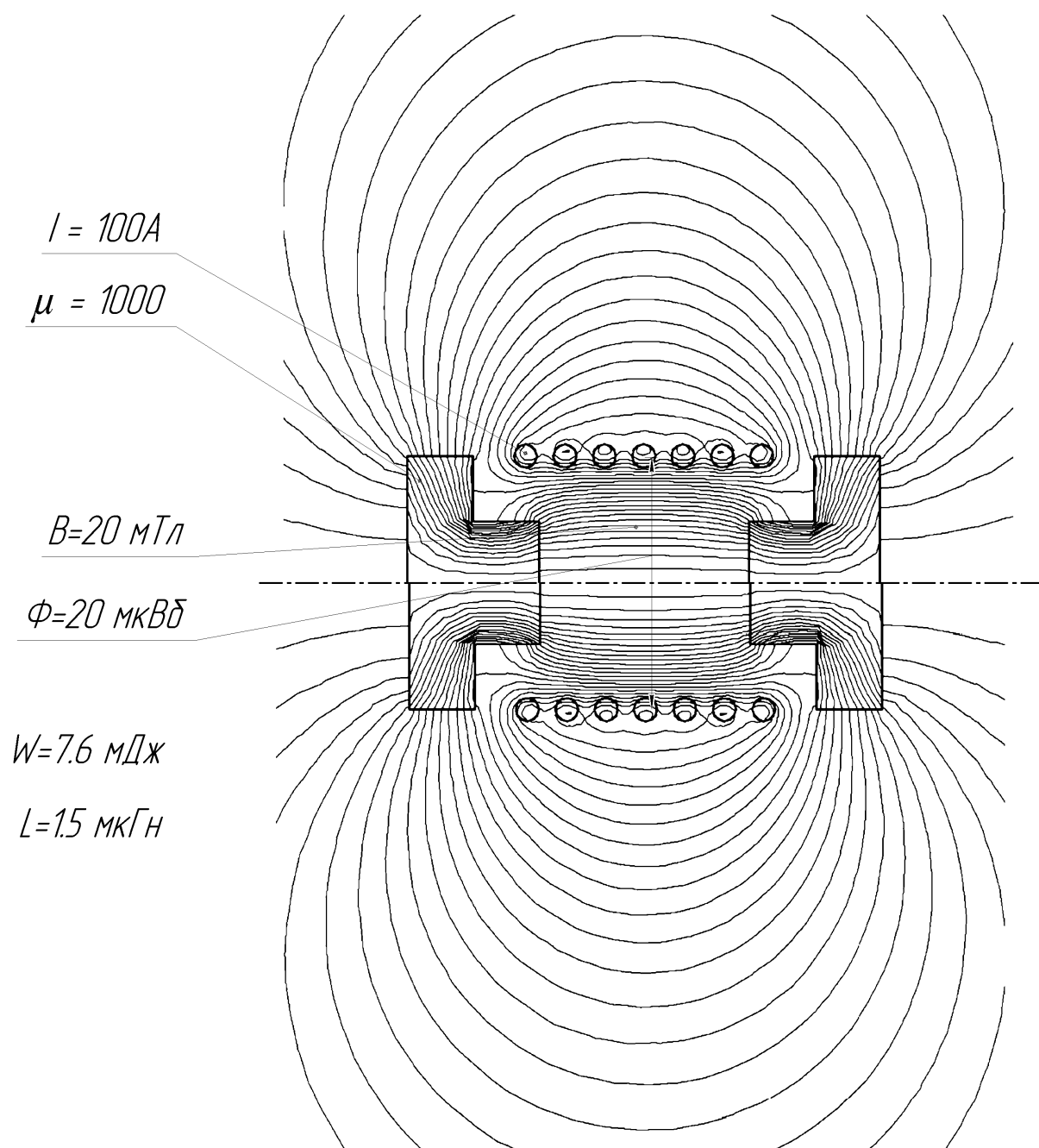


Рис. 3.5. Картина поля для статики (режим холостого хода) при наличии ферритов **ПОТОК не 20 а 23 мкВб**

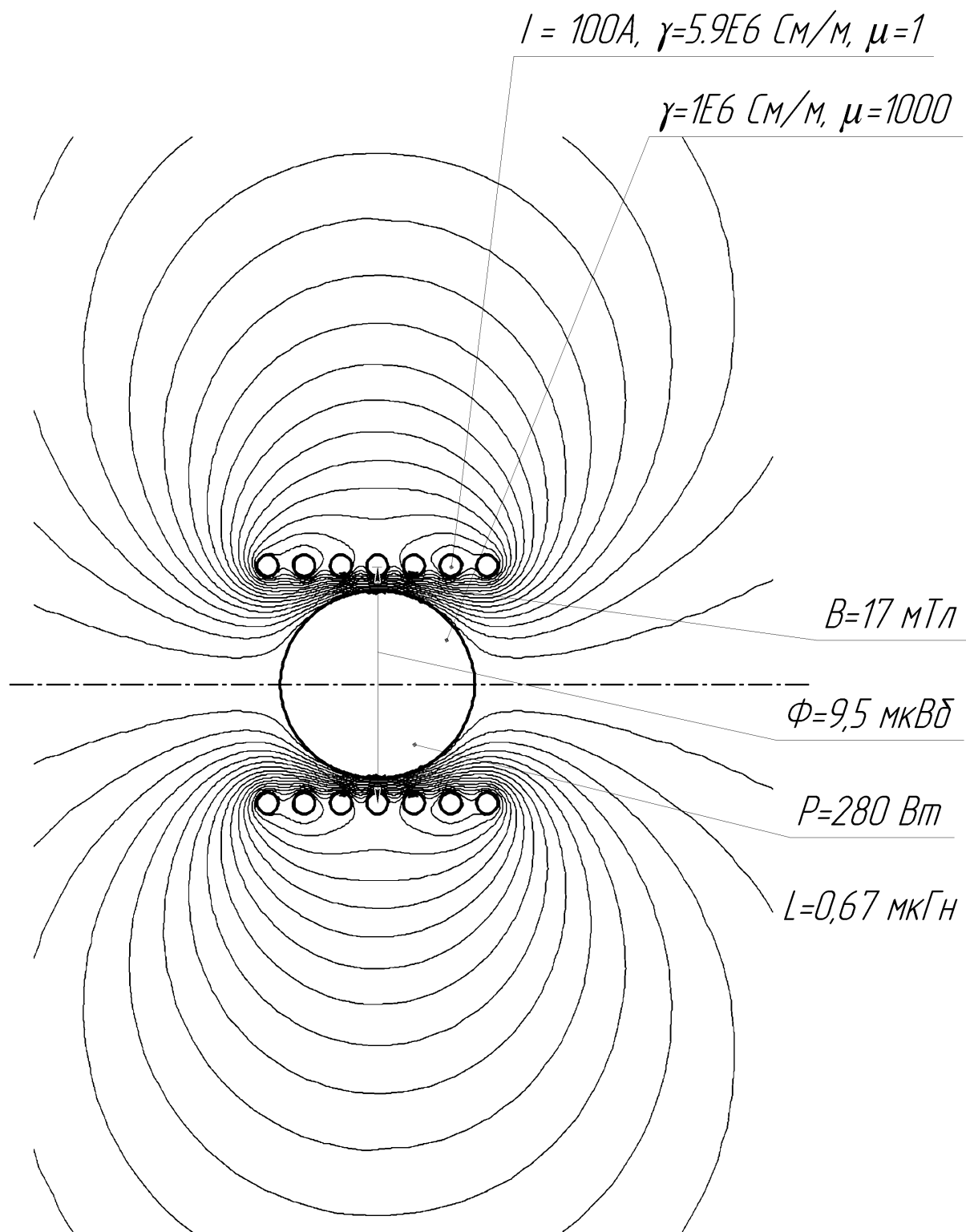


Рис. 3.6. Картина поля для динамики (режим расчета переменных токов) при отсутствии ферритов

$I = 100A, \gamma = 5.9E6 \text{ СМ/М}, \mu = 1$
 $\gamma = 1E6 \text{ СМ/М}, \mu = 1000$

$\mu = 1000$

$B = 19 \text{ мТл}$

$\Phi = 10 \text{ мкВб}$

$P = 365 \text{ Вт}$

$L = 0,76 \text{ мкГн}$

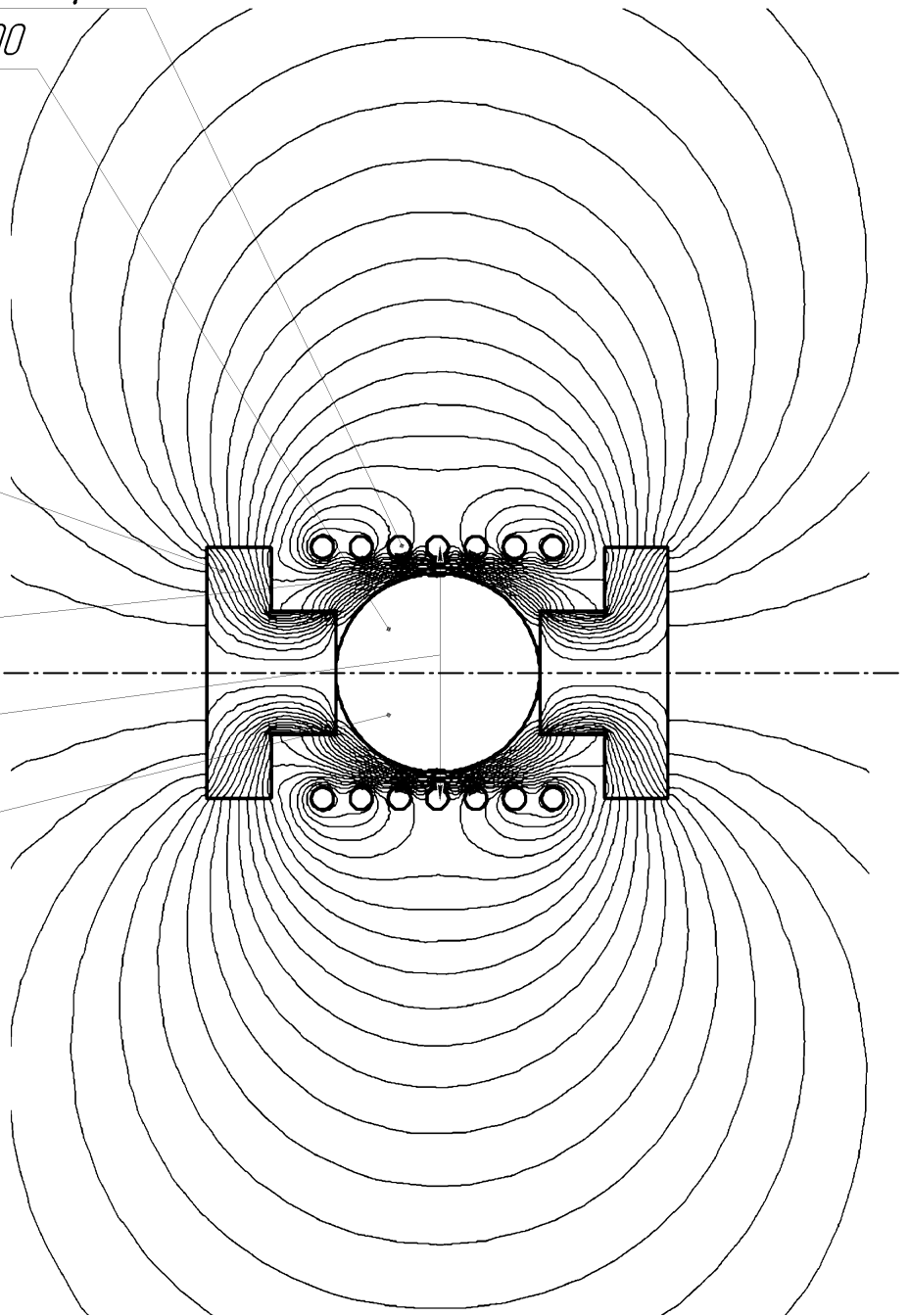


Рис. 3.7. Картина поля для динамики (режим расчета переменных токов) при присутствии ферритов

4. Экспериментальная часть

4.1. Изготовление макета установки

Изготовление установки осуществили в соответствии с разработанной принципиальной электрической схемой (рис.2.1) и перечнем элементов (см. в конце пояснительной записки).

Изготовление макета установки начали с изготовления индуктора с конденсаторной батареей. Индуктор изготовили из медной проволоки, намотав на цилиндрическое основание. Конденсаторы резонансного контура припаяли непосредственно к индуктору. Получившаяся конструкция изображена на рис. 4.1.



Рис. 4.1 – Первый вариант индуктора с конденсаторами.

В дальнейшем было принято решение уменьшить размер индуктора и уменьшить емкость конденсаторов (взять конденсаторы меньшей емкости).

Дроссели L1 и L2 изготовили (см. перечень элементов) на основе ферритовых колец, взятых из компьютерного блока питания (рис. 4.2).



Рис. 4.2 – Дроссели L1 и L2.

Согласно схеме рис. 2.1. все элементы (кроме индуктора и конденсаторов) разместили на поверхности монтажной платы. Полевые транзисторы VT1, 2 закрепили на алюминиевых радиаторах. Полученный печатный узел (рис. 4.3) вместе с вентилятором закрепили на текстолитовой плате, предназначенной для дальнейшего закрепления в пластиковом корпусе.

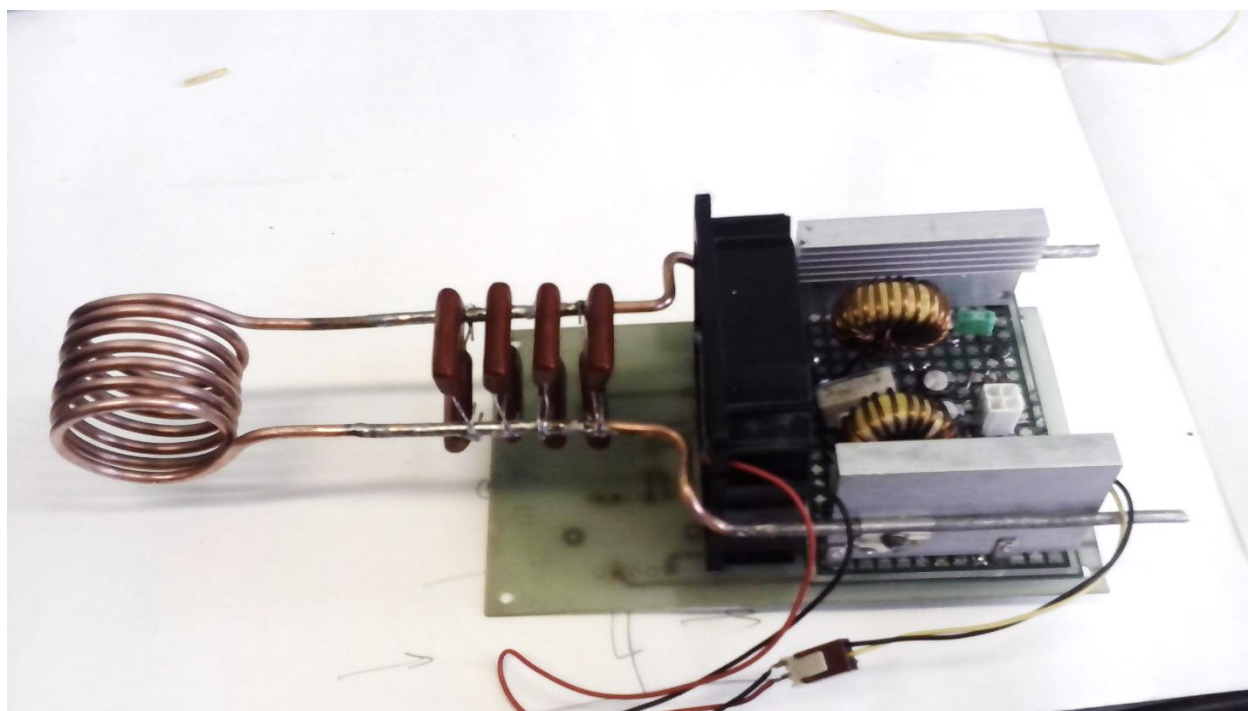


Рис. 4.3. – Печатный узел, индуктор и вентилятор.

4.2. Отладка макета

После сборки макета необходимо провести его экспериментальные исследования и устранить имеющиеся недостатки. Например, согласно осциллограммам напряжений на стоках транзисторов VT1 и VT2 (точки D1, D2 на рис.2.1) рис.4.4 было выявлено, что установленные изначально транзисторы IRF630N обладают слишком большим падением напряжения на них (порядка 2..3 В). После этого транзисторы были заменены на более низкоомные IRFZ44N, в настоящий момент установленные в схеме и указанные в перечне элементов.

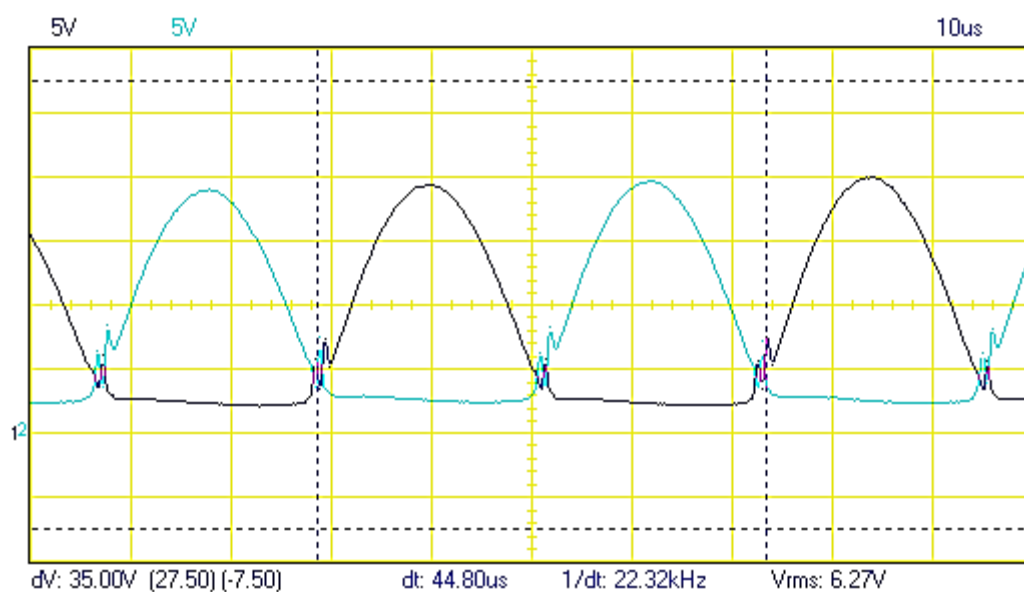


Рис. 4.4. – Осциллограммы напряжений на стоках транзисторов

Изначально для питания установки использовался блок питания от компьютера (его выхода +12В), однако его мощности оказалось недостаточно. Поэтому стали использовать автомобильный аккумулятор 12В.

В ходе отладки в схему было внесено множество изменений: добавлены резисторы Rsh1,2; перемотаны дроссели L1,2; изменены геометрические размеры индуктора; заменены конденсаты С и многое другое. Окончательная

схема и выбранные элементы представлены на рис. 2.1. и в перечне элементов.

4.3. Экспериментальные исследования

Для изучения эффективности работы установки индукционного нагрева провели снятие осциллограмм, характеризующих работу схемы.

Осциллограммы снимались в режимах:

1. **xx** - Режим холостого хода (отсутствие нагрузки внутри индуктора)
2. **гвоздь** - Режим с нагрузкой (ферромагнитный гвоздь, вставленный в индуктор)
3. **шарик** - Режим с нагрузкой (стальной шарик 32 мм)
4. **шарик+феррит** - Режим с нагрузкой (стальной шарик 32 мм и феррит (магнитопровод))
5. **Al трубка** – Режим с нагрузкой (алюминиевая, т.е. неферромагнитная трубка)
6. **Al трубка+феррит** - Режим с нагрузкой (алюминиевая, т.е. неферромагнитная трубка с ферромагнитным сердечником внутри)

Наиболее интересными сигналами для оценки работы схемы (рис.2.1.) являются:

1. **IL1, IL2** - токи дросселей L1 и L2, снимаемые на токоизмерительных шунтах Rш1,2 соответственно. Сопротивление шунтов составляет 0.1 Ом, поэтому для пересчета сигнала осциллографа (В) в токи (А) необходимо домножать его на коэффициент 10 А/В. Ввиду симметричности работы схемы осциллограммы токов одинаковы, приведем в работе диаграммы только для одной из индуктивностей;

2. **UL1, UL2** - напряжения на дросселях L1 и L2;

3. **UD1, UD2** - Напряжения на стоках транзисторов VT1 и VT2 (точки D1 и D2 соответственно);

4. **UG1, UG2** - Напряжения на затворах транзисторов VT1 и VT2 (точки G1 и G2 соответственно);

5. **Un** - Напряжение на индукторе Un

Список снятых осциллограмм приведен в таблице 4.1. Условные обозначения осциллограмм и режимов, используемые в таблице – см. выше.

Таблица 4.1. – Список снятых осциллограмм

Номер осциллограммы	Номер рисунка	Каналы CH1, CH2	Режим	Примечание
16, 18		IL2, UL2	xx	
19		IL2, UL2	ГВОЗДЬ	
20		UG1, UD1	xx	
21		UG1, UD1	ГВОЗДЬ	
22		UG1, UD2	xx	
25		UD1, UD2	ГВОЗДЬ	
26		UD1, UD2	xx	
29		Un	xx	
30		Un	ГВОЗДЬ	
33		IL1, UL1	xx	
34		IL1, UL1	ГВОЗДЬ	
37		IL1, UL1	xx	Ипотр= 7,5А Uп=12,5 В Рпотр=94 Вт
38		IL1, UL1	ГВОЗДЬ	Ипотр=16 А Uп=12 В Рпотр= 192 Вт
39, 40		IL1, UL1	шарик	Ипотр=27,6 А Uп=11 В Рпотр=304 Вт
41		IL1, UL1	шарик+феррит	Ипотр=30 А Uп=11 В Рпотр= 330 Вт
42,43		IL1, UL1	Al трубка	Ипотр=18,3 А Uп=12 В Рпотр=220 Вт
44		IL1, UL1	Al трубка+феррит	Ипотр=19,6 А Uп=12 В Рпотр=235 Вт

Примечание: Осциллограммы 16-34 снимались при питании от компьютерного блока питания, осциллограммы 37-44 снимались при питании от аккумулятора.

По осциллограммам IL1, UL1 рассчитывались значения потребляемого тока, напряжения питания и потребляемой мощности. Значение потребляемого тока $I_{потр}$ рассчитывалось по осциллограмме тока IL как среднее значение тока, умноженное на 2 (т.к. дросселей два). Значение питающего напряжения $U_{п}$ – как сумма положительного напряжения на дросселе и токоизмерительном шунте. Значение мощности $P_{потр}$ как произведения тока на напряжение $P_{потр} = I_{потр} \cdot U_{п}$.

Наиболее интересные осциллограммы приведены на рис.4.5-4.18.

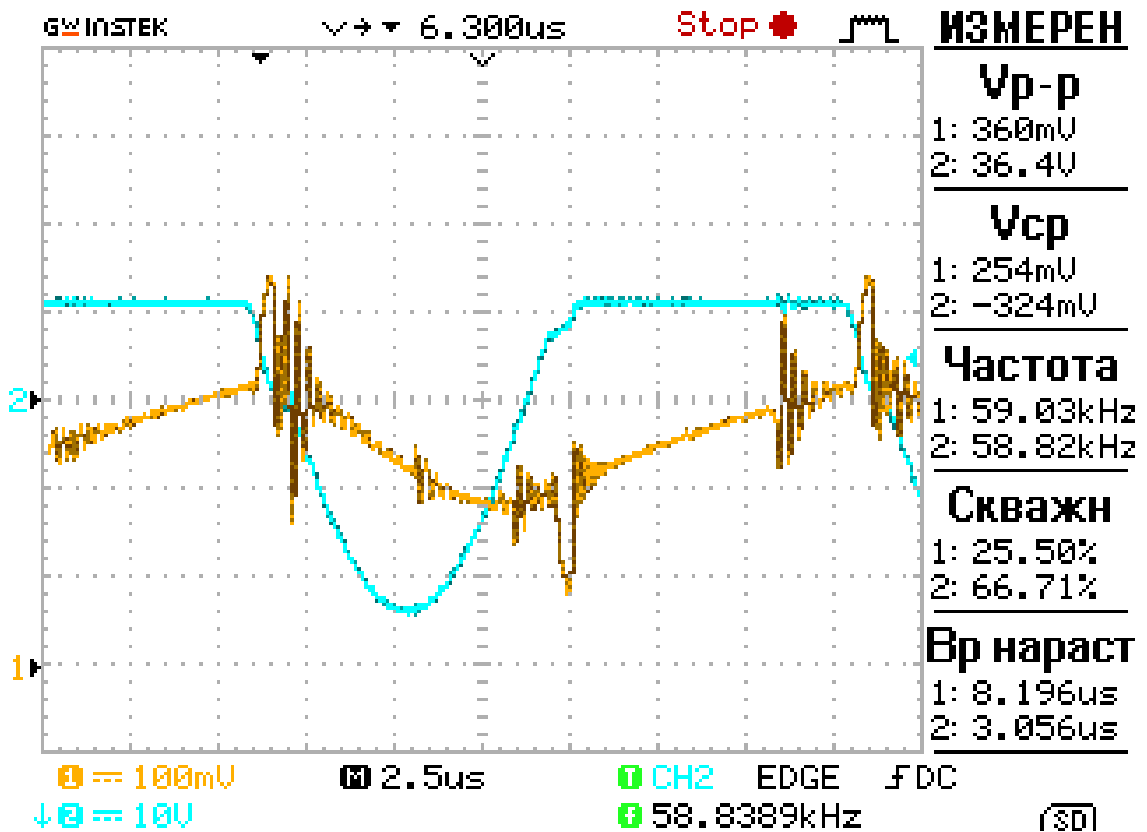


Рис.4.5 - Осцилограмма 16: IL2, UL2 в режиме хх.

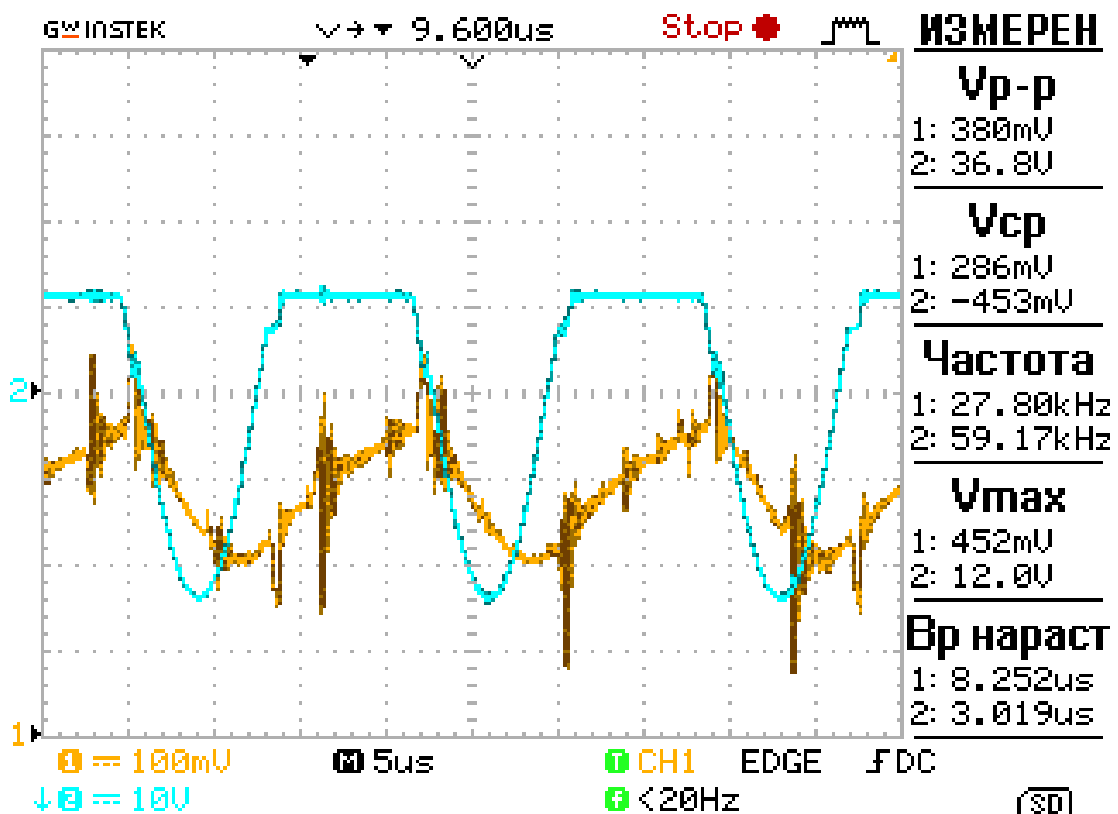


Рис.4.6 - Осциллограмма 34: IL1, UL1 в режиме хх.

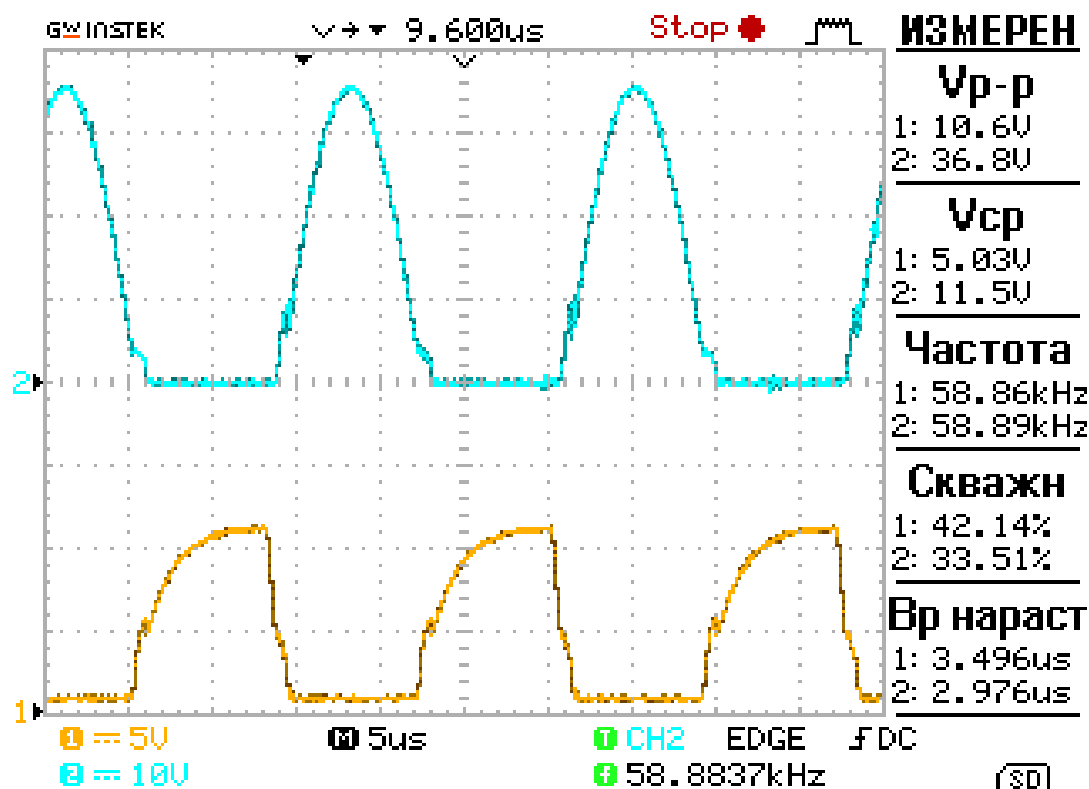


Рис.4.7 - Осциллограмма 20: UG1, UD1 в режиме хх.

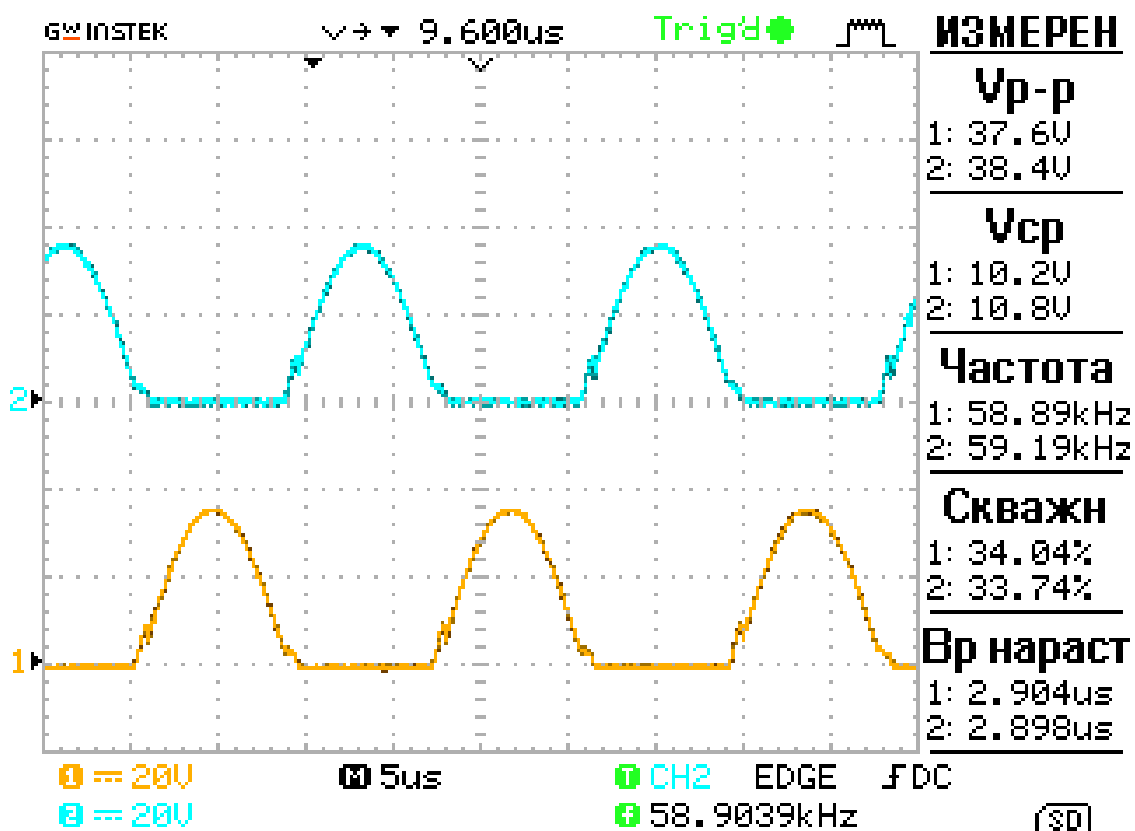


Рис.4.8 - Осциллограмма 26: UD1, UD2 в режиме хх.

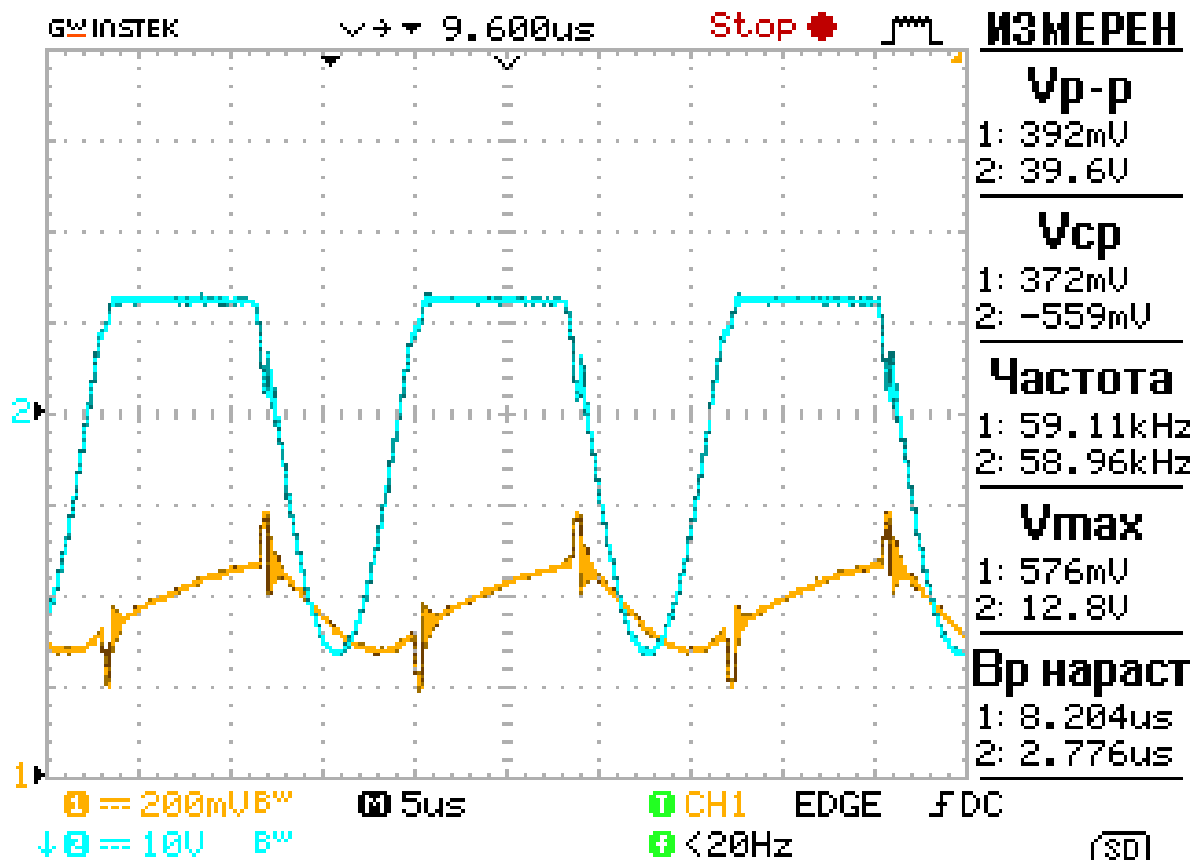


Рис.4.9 - Осцилограмма 37: IL1, UL1 в режиме хх.

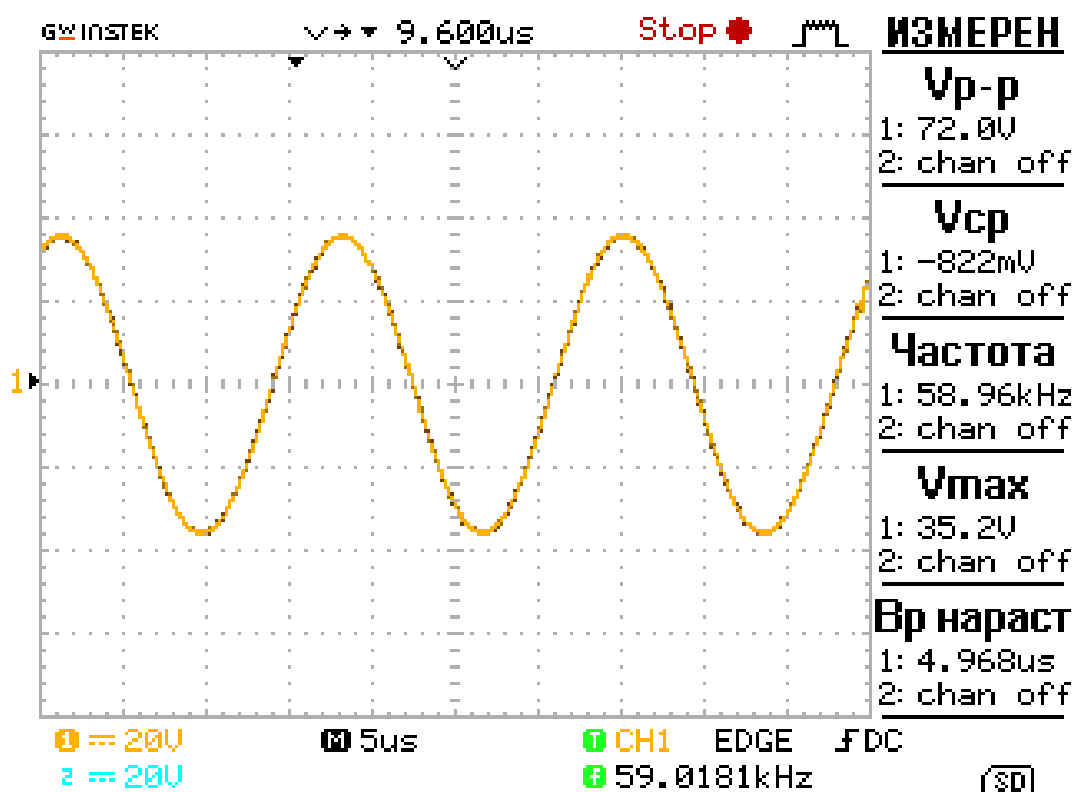


Рис.4.10 - Осцилограмма 29: Ун в режиме хх.

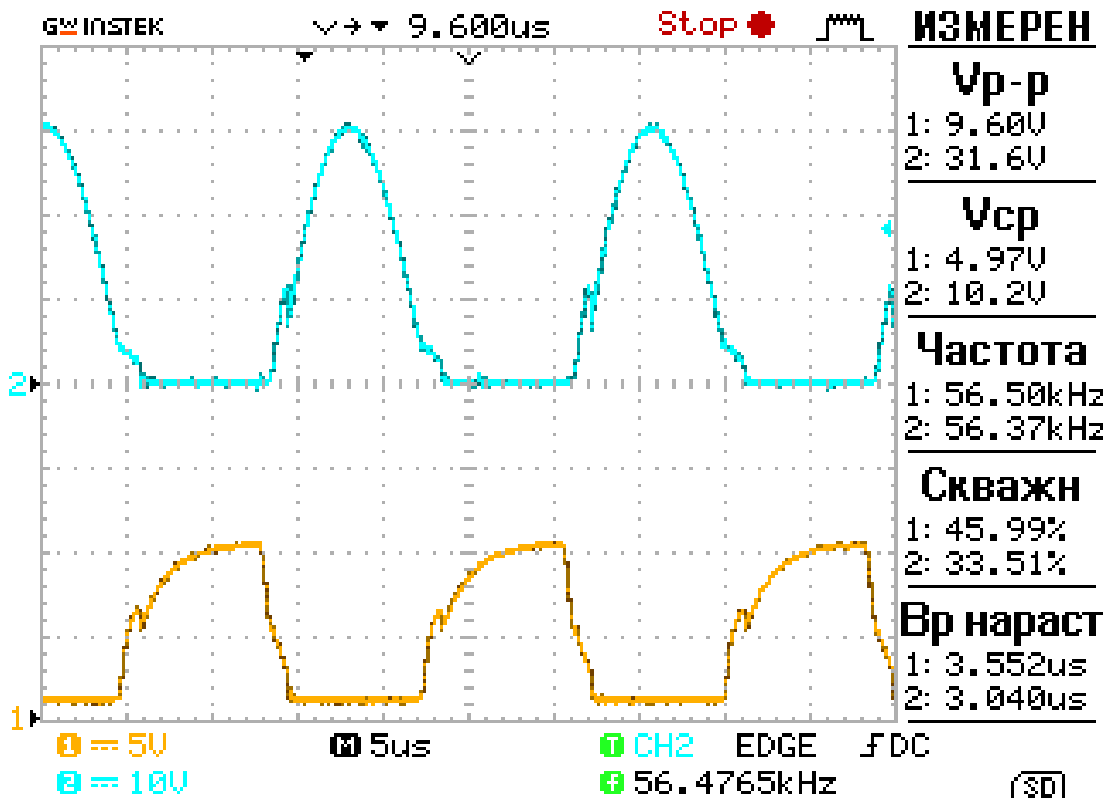


Рис.4.11 - Осцилограмма 21: UG1, UD1 в режиме гвоздь.

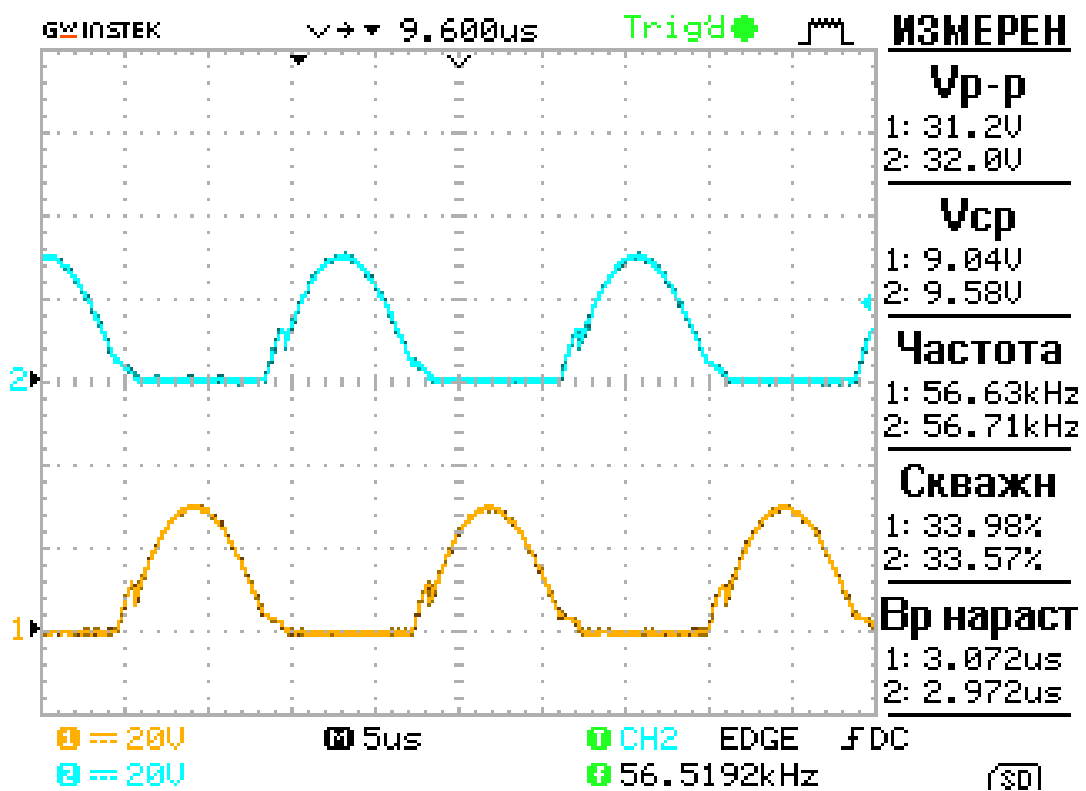


Рис.4.12 - Осцилограмма 25: UD1, UD2 в режиме гвоздь.

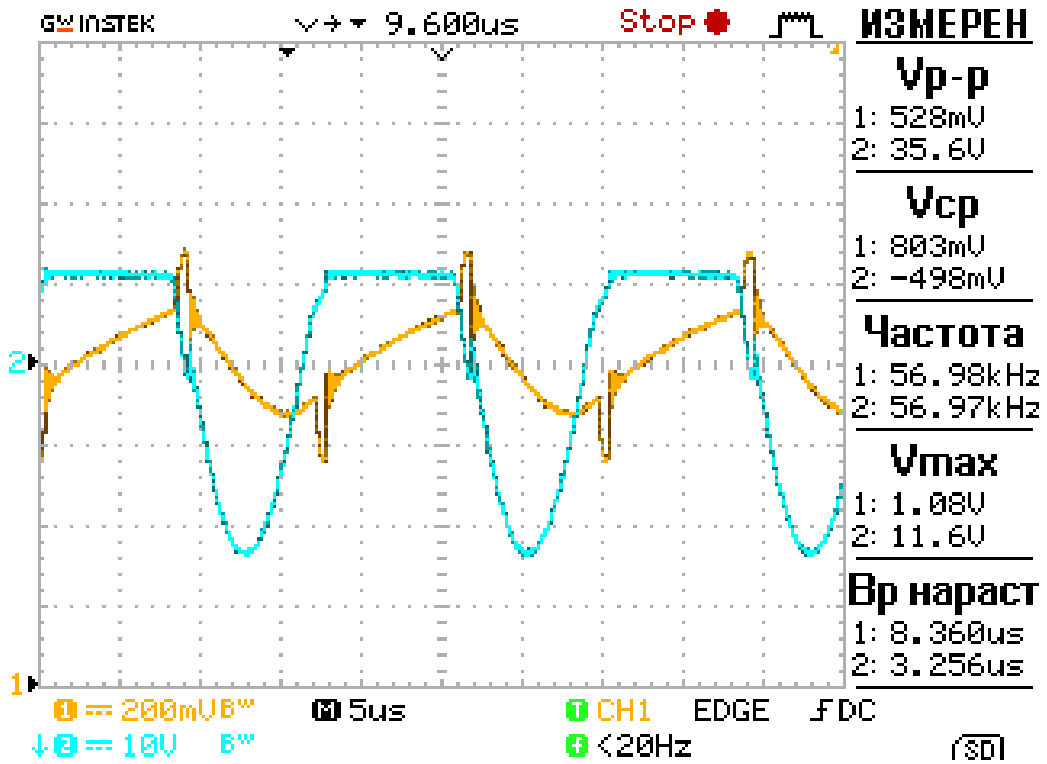


Рис.4.13 - Осцилограмма 38: IL1, UL1 в режиме гвоздь.

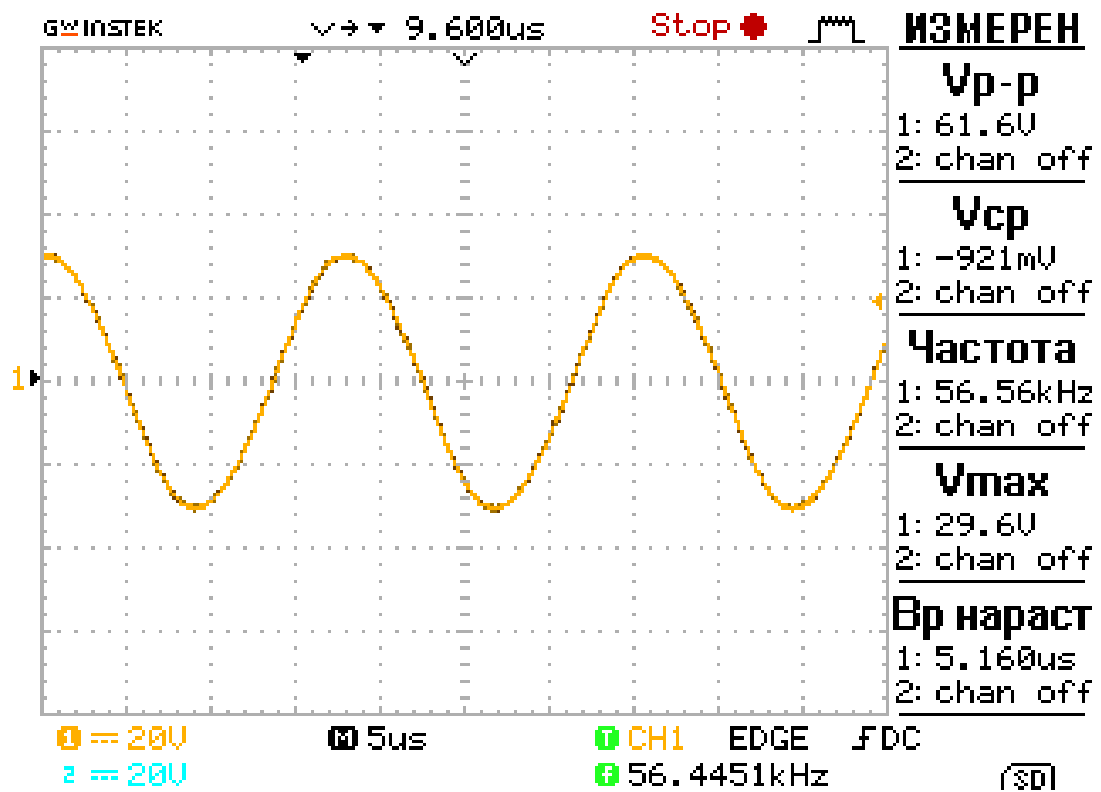


Рис.4.14 - Осцилограмма 30: Un в режиме гвоздь.

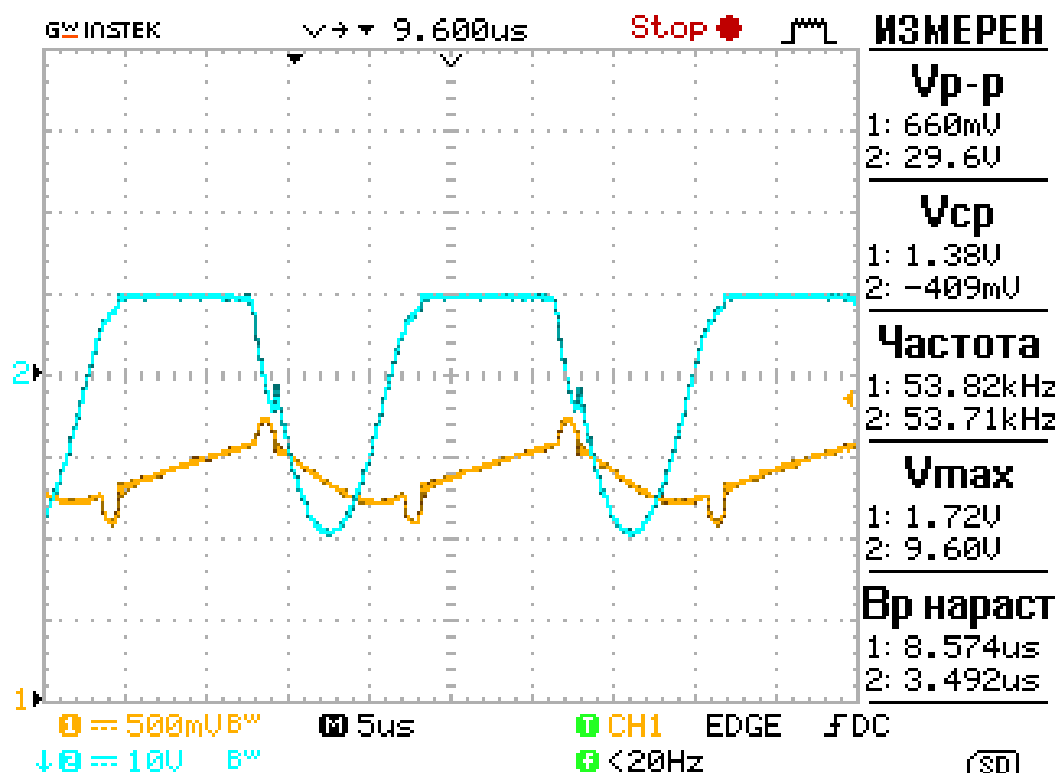


Рис.4.15 - Осцилограмма 40: IL1, UL1 в режиме шарик.

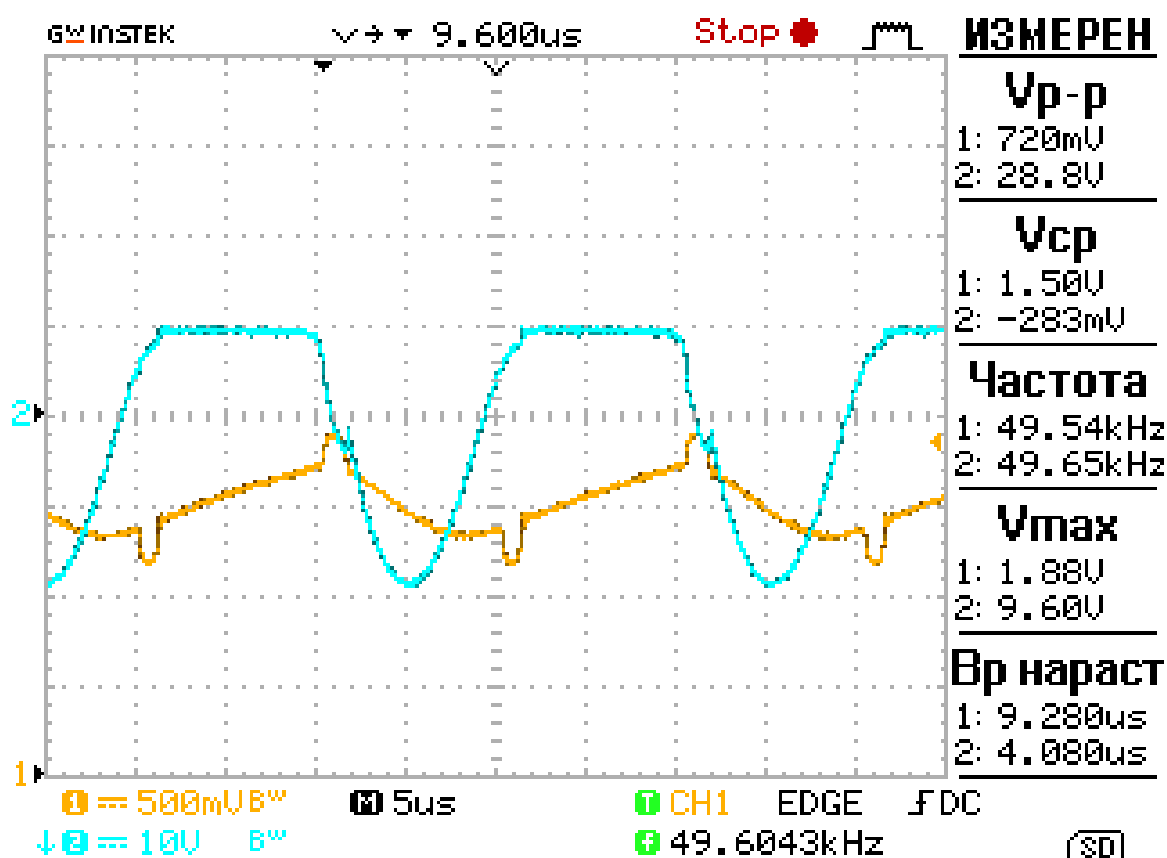


Рис.4.16 - Осцилограмма 41: IL1, UL1 в режиме шарик+феррит.

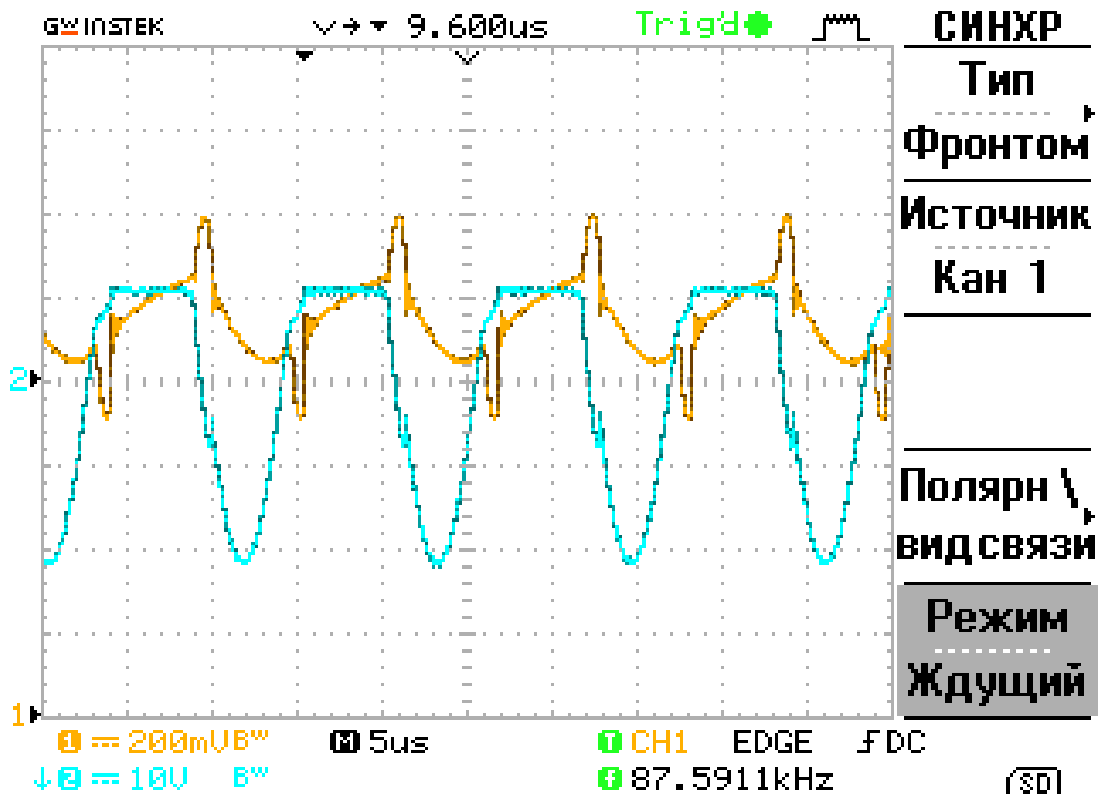


Рис.4.17 - Осциллограмма 43: IL1, UL1 в режиме А1 трубка.

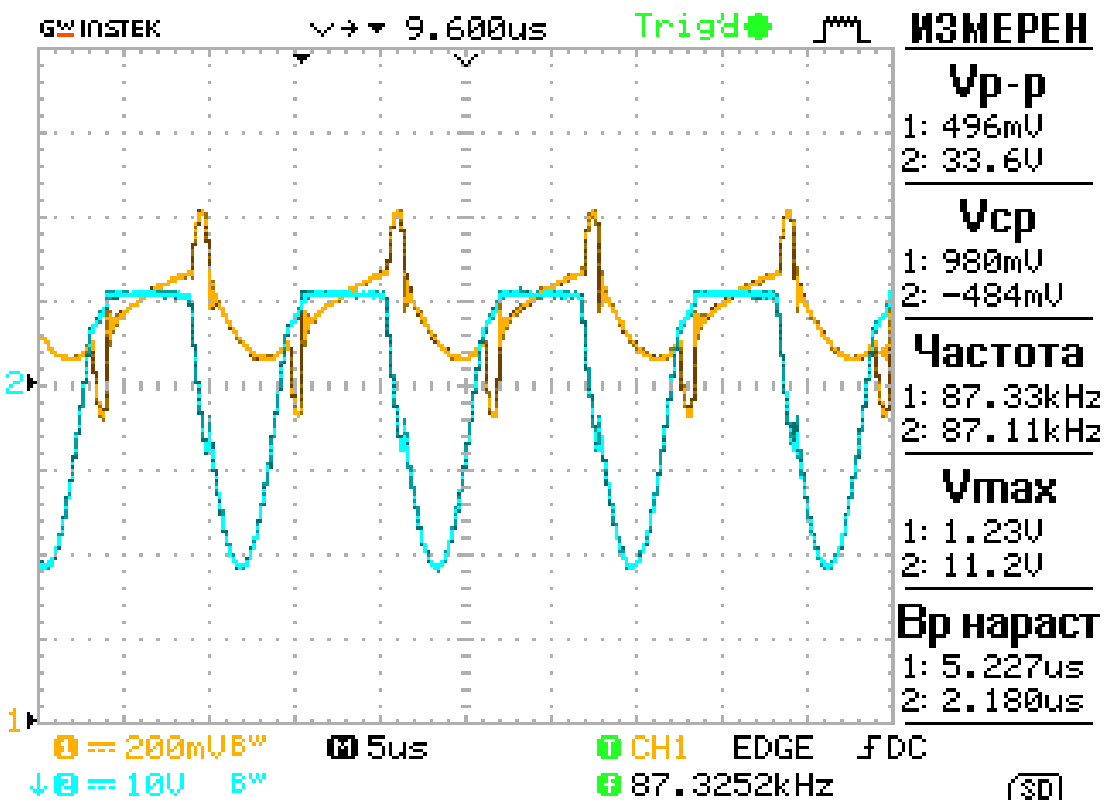


Рис.4.18 - Осциллограмма 44: IL1, UL1 в режиме А1 трубка+феррит.

Сравнивая осциллограммы 16 и 37 (рис. 4.5 и 4.9) можно увидеть, что при замене блока питания на аккумулятор амплитуды токов и напряжений практически не изменились, однако значительно снизился уровень помех на сигнале тока.

Согласно результатам экспериментальных исследований, рабочая частота (для режима холостого хода) составляет 59 кГц. Согласно результатам математического моделирования (3.1), частота должна была получиться 62кГц, что очень близко к полученной экспериментально и может свидетельствовать об адекватности проведенного математического моделирования.

Экспериментальное определение полного КПД индукционного нагрева.

Экспериментально определение КПД установки произвели следующим образом. В качестве нагреваемой заготовки использовали стальной шарик диаметром $D=32$ мм. Шарик нагревался, и по разнице температур, времени нагрева и потребляемой установкой мощности рассчитывалось КПД.

К сожалению, с замером температуры шарика возникли сложности. Инфракрасный пирометр оказался непригоден для замеры температуры шарика (показывал разные температуры при различных углах направления на шарик). Возможно, он предназначен для замера температуры плоских поверхностей. В связи с этим, температуру определяли следующим способом:

Начальное значение температуры шарика $T_1=35$ С определили на ощупь. Далее на шарик капнули каплю воды и нагревали его в установке. Когда капля начала закипать, сделали вывод о нагреве шарика до $T_2=100$ С. Время нагрева составило $t=40$ с. Потребляемая при нагреве установкой

мощность составила $P_{\text{потр}}=304$ Вт (см. строчку «осциллограмма 40» в табл.4.1).

Итого, за время нагрева установка потребила

$$A = t \cdot P_{\text{потр}} = 40 \cdot 304 = 12 \text{ кДж}$$

Нашли объем шарика

$$V = 1/6 \cdot \pi \cdot D^3 = 1/6 \cdot 3.14 \cdot (3.2 \text{ см})^3 = 17 \text{ см}^3 \quad (4.1)$$

Через плотность стали $\rho=7.9$ г/см³ выразили массу шарика

$$m = V \cdot \rho = 17 \text{ см}^3 \cdot 7.9 \text{ г/см}^3 = 135 \text{ г} = 0.135 \text{ кг} \quad (4.2)$$

Далее подсчитали количество тепла, полученного шариком при нагреве

$$Q = m \cdot C \cdot (T_2 - T_1) = 0.135 \cdot 450 \cdot (100 - 35) = 3.95 \text{ кДж}, \quad (4.3)$$

где $C = 450$ Дж / кг·К – удельная теплоемкость стали

Полный КПД нагрева составил

$$\eta = Q / A = 3.95 / 12 = 0.33 = 33\% \quad (4.4)$$

Таким образом, проведенные в данной главе экспериментальные исследования подтвердили работоспособность установки и правильность теоретических предпосылок, принятых при ее расчете.

Заключение

В данной выпускной квалификационной работе осуществлена разработка, математическое моделирование, изготовление, отладка и экспериментальное исследование действующего макета установки индукционного нагрева.

Макет установки позволяет нагревать до красна (500 С и более) крупные гвозди или шурупы (ферромагнитные). Алюминиевая трубка (неферромагнитная) может быть нагрета до меньших температур.

Энергия, потребляемая установкой зависит от нагреваемой заготовки (100 Вт для холостого хода, 200 Вт для крупного гвоздя и 300 Вт для стального шарика диаметром 32 мм).

Попытки использования ферритовых магнитопроводов для концентрации поля с целью усиления нагрева не привели к значительным положительным результатам.

Сравнение результатов математического моделирования с результатами экспериментальных исследований подтвердило адекватность проведенного моделирования.

На данный момент времени созданный макет установки используется в качестве демонстрационного пособия при обучении студентов и профагитационных мероприятий со школьниками. С участием макета отснят цикл видеороликов [8,9], агитирующих к поступлению в ТГУ.

Список литературы

1. https://ru.wikipedia.org/wiki/Индукционный_нагрев - индукционный нагрев
2. <http://www.укм-58.пф/dictionary/moshchnii-invertor.php> - мощный инвертор
3. http://otvet.imgsmail.ru/download/fb48e7fa0b3df49d7c1d9ef9818449a3_h-31.jpg
4. <http://www.icct.ru/sites/default/files/Invertor-02.pdf>
5. <http://www.icct.ru/sites/default/files/Invertor-01.pdf>
6. www.platan.ru
7. www.chip-dip.ru
8. <https://youtu.be/c2eSuE8RPHk>
9. <https://youtu.be/oDlg8nR6Fj8>
10. Миловзоров О. В. Электроника : учеб. для вузов / О. В. Миловзоров, И. Г. Панков. - Изд. 4-е, стер. ; Гриф МО. - М. : Высш. шк., 2008. - 288 с.
11. Б.В. Тарабрин, С.В. Якубовский, Н.А. Барканов и др.: справочник по интегральным микросхемам. – М.: Энергия, 1980. – 816 с., ил.
12. Воронин, П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение/ П.А. Воронин. - М.:Издательский дом “Додека-XXI”, 2001. – 384 с.
13. Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники: учеб.пособ./ Зиновьев, Г.С. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. - 664с.
14. Смердов, В. Силовые модули на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором / В. Смердов, А. Образцов // Электронные компоненты. - 2005 . - №1.
15. Флоренцев, С.Н. Состояние и тенденции развития силовых IGBT-модулей // Электротехника.- 2000.- №4.

16. Гуртов В. Твердотельная электроника : учеб. пособие для вузов / В. Гуртов. - 2-е, доп. изд. ; Гриф УМО. - Москва : Техносфера, 2007. - 407 с. : ил. - (Мир электроники).

17. Ямпурин Н. П. Электроника [Электронный ресурс] : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Н. П. Ямпурин, А. В. Баранова, В. И. Обухов. - М. : Академия, 2011.

18. Подкин Ю. Г. Электротехника и электроника [Электронный ресурс]. В 2 т. Т. 2. Электроника : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Ю. Г. Подкин, Т. Г. Чикуров, Ю. В. Данилов; под ред. Ю. Г. Подкина. - Гриф УМО. - М. : Академия, 2011.

19. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М.: Высшая школа, 1982. – 496с.

20. Белов Г. А. Электроника и микроэлектроника : учеб. пособие для вузов / Г. А. Белов. - 2-е изд., испр. ; Гриф МО. - Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2001. - 377 с. : ил.