

Олимпиада школьников «Шаг в будущее», научно- образовательное  
соревнование «Шаг в будущее, Москва»

## **Многофункциональный прибор для демонстрации и изучения электрических явлений**

**Автор:** Сафаров Мурат Альфредович,  
МОУ Гимназия №39 г. Уфа, 11 класс

**Руководитель:** Аитов Иршат Лутфуллович  
УГАТУ, к.т.н., доцент

# **ВВЕДЕНИЕ**

## **Современное состояние проблемы:**

- В настоящее время школьное демонстрационное и лабораторное оборудование по физике в большинстве своем является неинтересным и морально устаревшим
- Выпускаемые сегодня промышленностью демонстрационные приборы являются повторением старых и не расширяют круг изучаемых явлений
- Зарубежное учебное оборудование дорого и недоступно для большинства российских школ

## **Актуальность проблемы:**

- Снижается интерес учащихся к изучению физических явлений и законов
- Тенденция познавать технику лишь на пользовательском уровне (не вникая в суть физических явлений, лежащих в основе её работы)

## **Цель работы:**

Создание качественно новой демонстрационной установки по электродинамике, основой которой будет являться трансформатор Тесла.

## **Требования к устройству:**

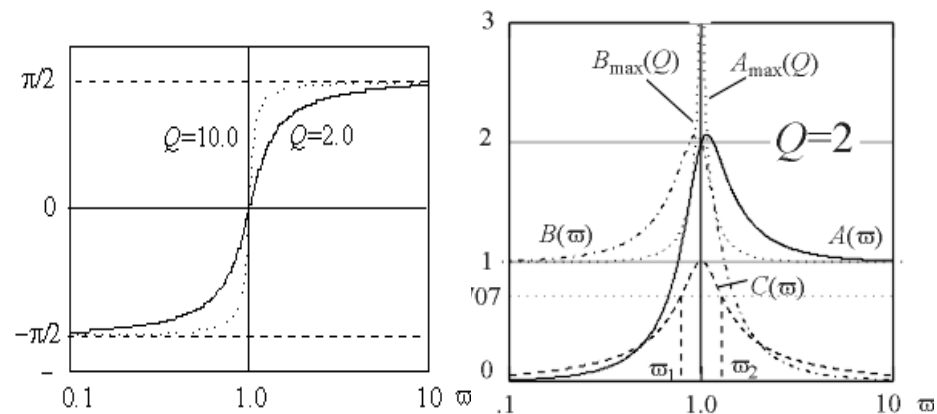
- безопасность;
- эргономичность;
- надёжность;
- универсальность;
- наглядность;
- зрелищность и инвариантность.

## **Решаемые задачи:**

- Математическое и компьютерное моделирование
- Схемотехническое, конструкторское и технологическое проектирование
- Всесторонние экспериментальные исследования
- Составление методического пособия по работе с устройством
- Обеспечение безопасности

# МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ

## Математическое моделирование и расчет параметров трансформатора Тесла



$$U_{L0} = \omega_0 L I_0 = \frac{L I_0}{\sqrt{LC}} = \rho I_0; \quad U_{C0} = \frac{I_0}{\omega_0 C} = \frac{\sqrt{LC} I_0}{C} = \rho I_0$$

$$\omega_A = \frac{Q}{\sqrt{Q^2 - \frac{1}{2}}} \Bigg|_{A=A_{\max}}; \quad \omega_B = \frac{\sqrt{Q^2 - \frac{1}{2}}}{Q} \Bigg|_{B=B_{\max}}$$

$$f = \frac{c}{\pi D_2 W_2}$$

$$W_2 = 9.7 \frac{l_2}{d_{2Cu}}$$

$$L_2 = \frac{0.01 \cdot W_2^2 \cdot D_2}{\frac{l_2}{D_2} + 0.45}$$

$$C_{Lsec} = D_2 \left( 0.3777 + 0.0755 \frac{l_2}{D_2} + \frac{2.366}{10^3} \left( \frac{l_2}{D_2} \right)^2 \right)$$

$$C_{tor} = \left( 1 + \left( 0.2781 - \frac{Td_2}{Td_1} \right) \right) \cdot 2.8 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot (Td_1 - Td_2) \cdot Td_2}{25.8}}$$

$$\Delta = c \sqrt{2 \frac{\epsilon_0}{\omega \mu_m} \rho}$$

$$f = \frac{10^6}{2 \pi \sqrt{(L_2 \cdot C_2)}}$$

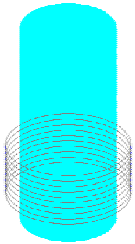
$$C_2 = C_{Lsec} + C_{tor}$$

- $l_2 = 392,7 \text{ мм,}$
- $d_{2Cu} = 0.31 \text{ мм,}$
- $W_2 = 1267,$
- $L_2 = 40.7 \text{ мГн,}$
- $C_{Lsec} = 7.1 \text{ пФ,}$
- $C_{tor} = 11.649 \text{ пФ,}$
- $C_2 = 18.749 \text{ пФ,}$
- $\Delta = 0.155 \text{ мм,}$

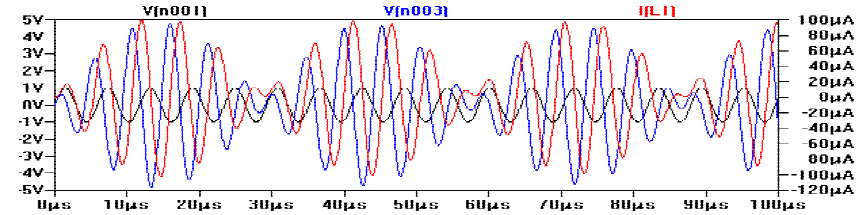
# МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ

## Компьютерное моделирование трансформатора Тесла

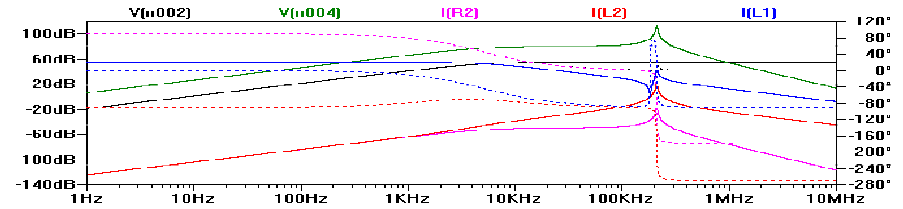
### Моделирование в САПР INCA:



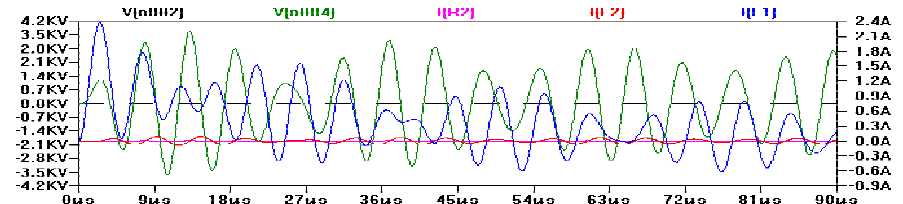
Maxwell primary inductance: L1: 0.0307240242 mH ← used  
n2=1267.00; h2= 0.39; r21= 0.10; r22= 0.10; b2= 0.00; d2=0.0003  
Wheeler secondary inductance L2: 40.7912150770 mH  
Lundin secondary inductance L2: 40.7733048857 mH  
Lorenz secondary inductance L2: 40.7732995802 mH  
Snow secondary inductance L2: 40.7362267013 mH  
Kirchhoff secondary inductance L2: 40.7362003749 mH  
Maxwell secondary inductance: L2: 40.7751034093 mH ← used  
Calculating mutual inductance between general coils with circular turns...  
Mutual inductance M: 0.99591813202771 mH ← used  
Snow M (two current-sheet solenoids): 0.99578812594582 mH  
Turns-independent k from Lorenz L and Snow M: 0.49416251677243  
Coupling coefficient k: 0.49552172197667  
Mode: 1.4: 2.4



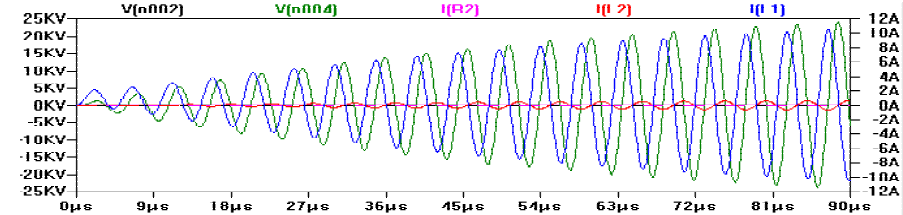
Временные диаграммы напряжения и тока на различных элементах контура при частоте тока, отличной от резонансной



АЧХ и ФЧХ напряжения и тока различных элементов КТ

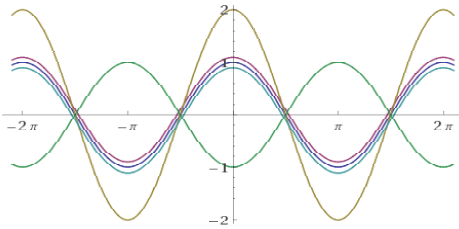


Временные диаграммы напряжения и тока на различных элементах КТ при частоте тока, отличной от резонансной



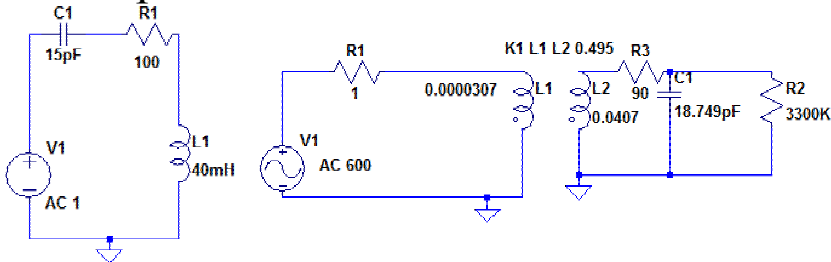
Временные диаграммы напряжения и тока

### Моделирование в Wolfram Mathematica:



Временная диаграмма напряжений и токов с учетом интерференции

### Моделирование в САПР SwitcherCAD:

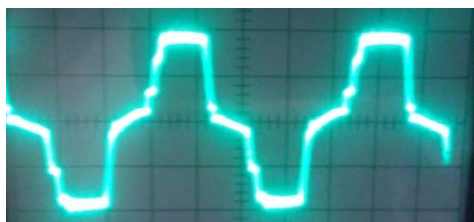
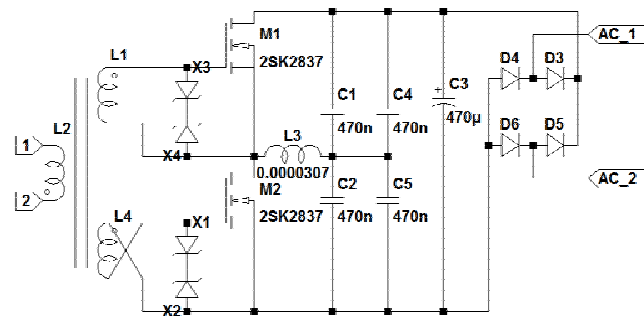
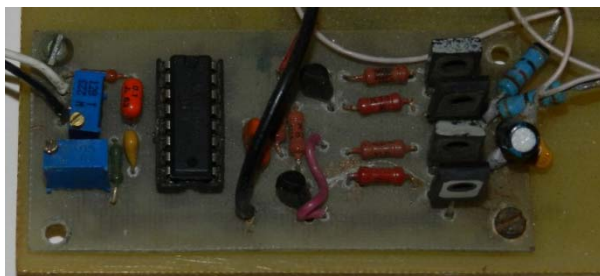
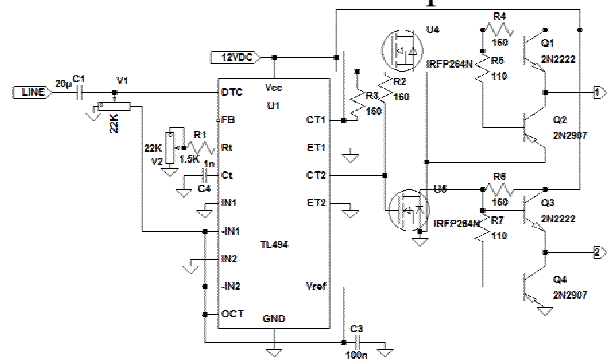


Далее: схемотехническое проектирование

# МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ

## ЭТАП #1: блок управления с полумостовым инвертором и трансформаторной развязкой

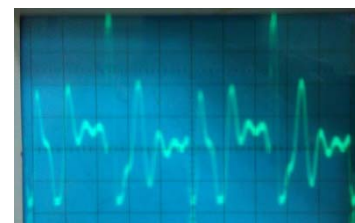
- Низкая мощность
- Высокие тепловые потери



Сигнал на выходе управляющей части



Сигнал на выходе трансформатора

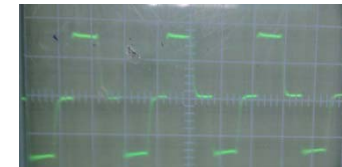
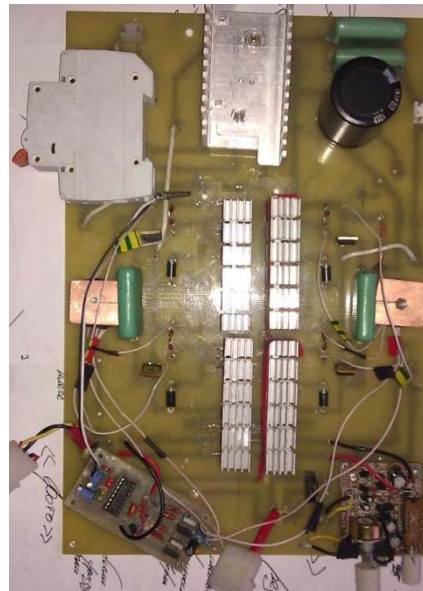
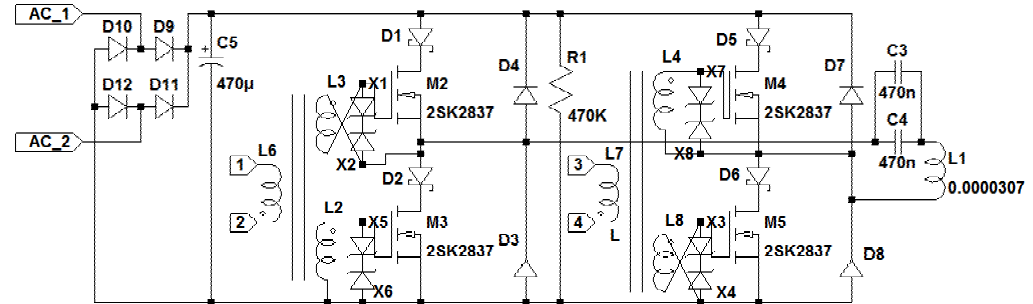
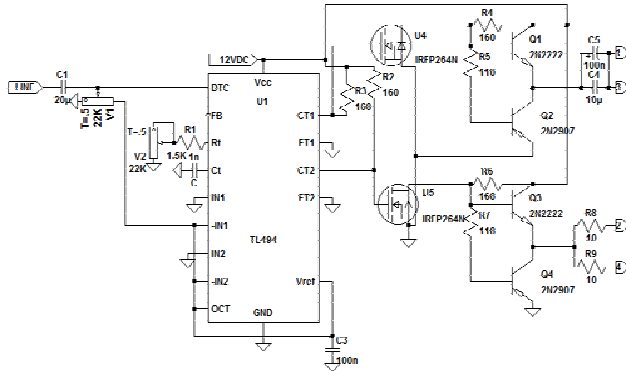


Дифференциальный сигнал на выходе инвертора

# МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ

## ЭТАП #2: блок управления с мостовым инвертором и трансформаторной развязкой

- Существенно увеличена мощность



Сигнал на выходе управляющей части



Сигнал на выходе трансформатора



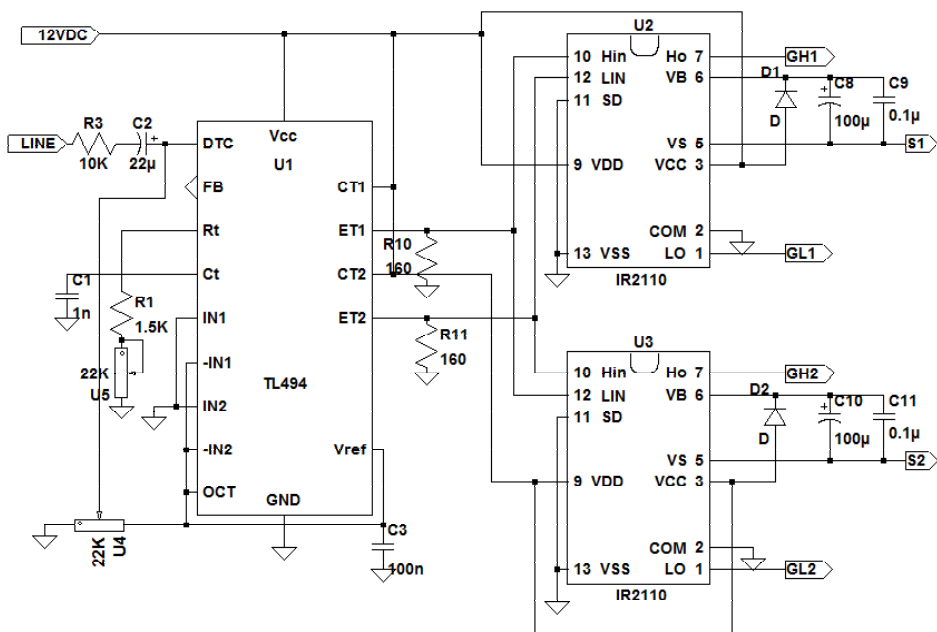
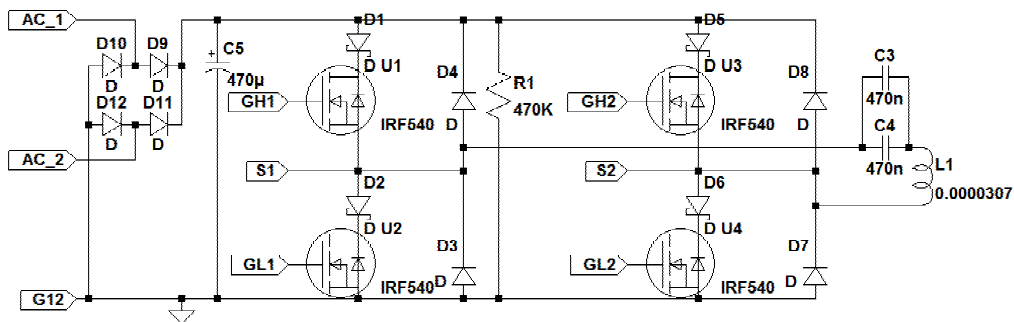
Дифференциальный сигнал на выходе инвертора



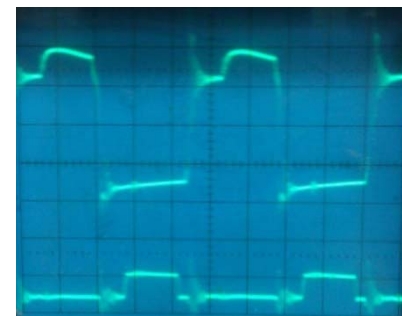
# МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ

## ЭТАП #3: блок управления с мостовым инвертором и интегральными драйверами

- Уменьшение тепловых потерь
- Снижение устойчивости схемы



Сигнал на выходе ШИМ  
- модулятора



Сигнал на выходе  
инвертора (сверху), на  
затворе транзистора  
нижнего плеча инвертора  
(снизу)



# МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ

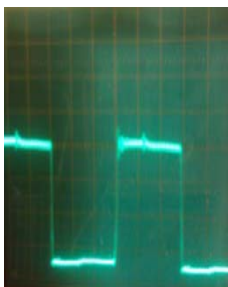
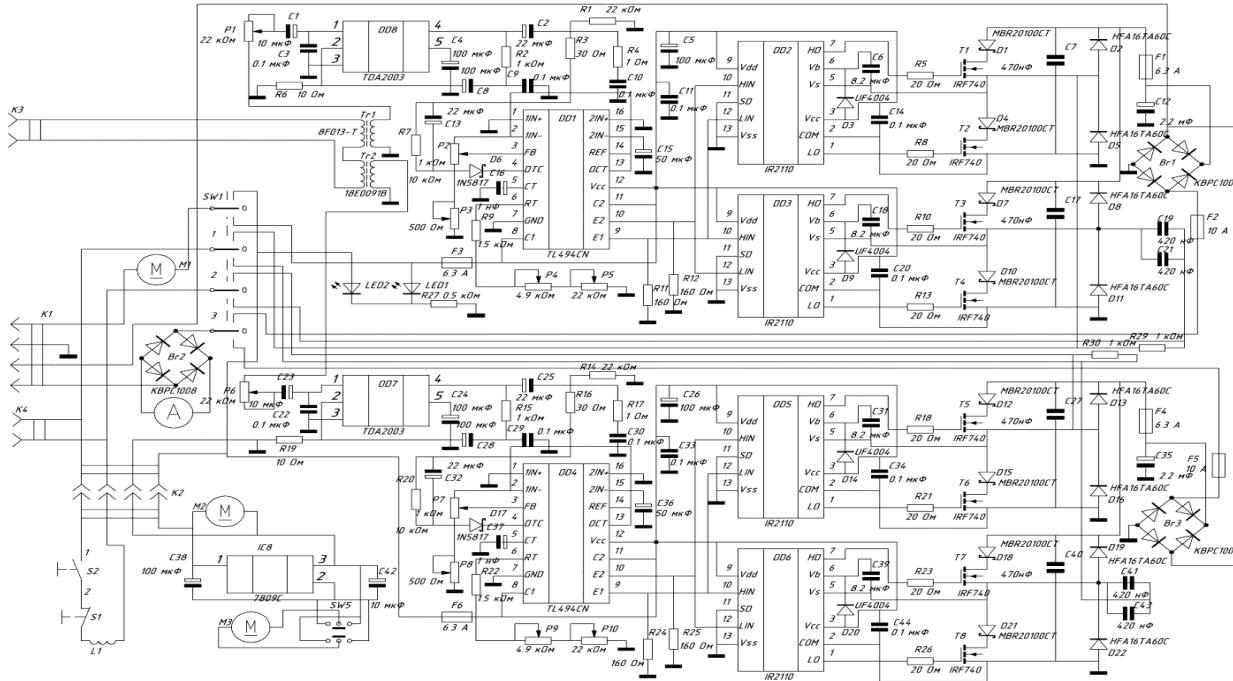
## ЭТАП #4: методы обеспечения устойчивой работы схемы блока управления

Негативный фактор	Метод решения
Искажения ШИМ-сигнала управляющей части	Применение фильтрующих конденсаторов в управляющей части
Эффект Миллера в MOSFET транзисторах, тиристорный эффект в драйверах	<ul style="list-style-type: none"><li>- Уменьшение паразитной индуктивности соответствующих проводников печатной платы</li><li>- Применение транзисторов с низкой затворной емкостью</li><li>- Ограничение затворного тока транзисторов инвертора</li></ul>
Перегрев силовых элементов	Принудительная вентиляция и установка силовых элементов на радиаторы
Импульсные помехи в цепи первичной обмотки КТ	Применение ультрабыстрых диодов и диодов Шотки
Влияние ЭМИ от КТ и других устройств	Экранирование корпуса блока управления
Выход инвертора из строя при отключении нагрузки	Применение балластного резистора на выходе инвертора

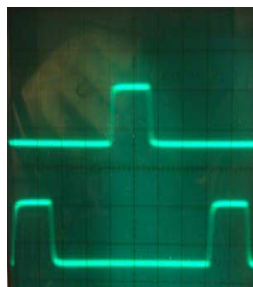
# МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ

## Результат схемотехнического проектирования

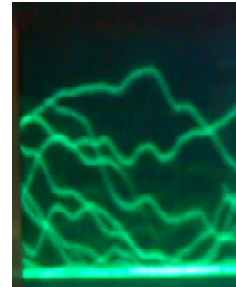
- Надежность
- Низкие тепловые потери
- Возможность быстрой точной настройки на резонансную частоту
- Введена возможность регулировки скважности аналоговым сигналом



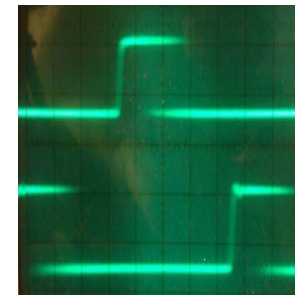
Сигнал на истоке транзистора верхнего плеча инвертора



Сигнал на затворах транзисторов инвертора



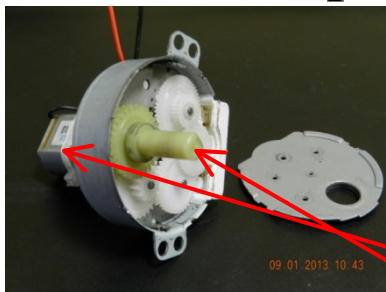
Входной аналоговый сигнал DTC



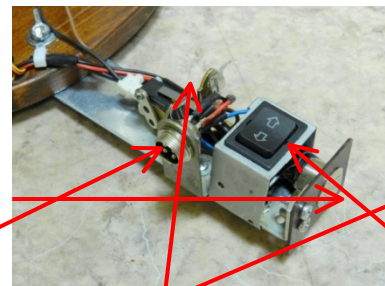
Модуляр. ШИМ сигнал

# МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ

## Методы и решения конструкторского проектирования



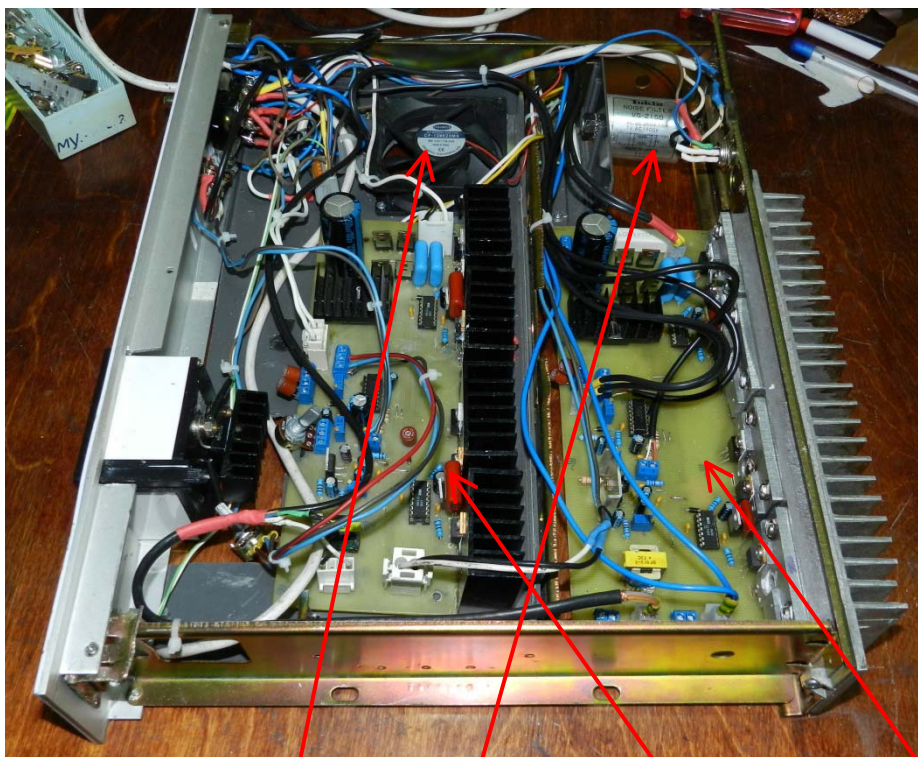
Электромеханический привод: редуктор, двигатель, воронка



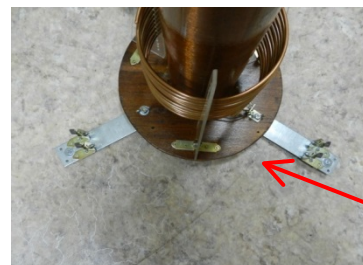
кнопка - размыкатель



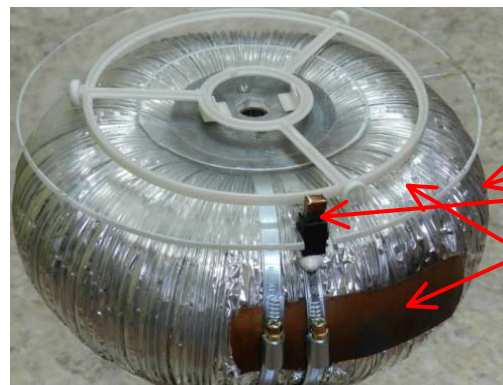
Гнездо разъема, концевой выключатель; клавиша управления;



Блок управления: вентилятор, LC – фильтр, резервная схема, основная схема



Пластины основания: развернуты; сложены

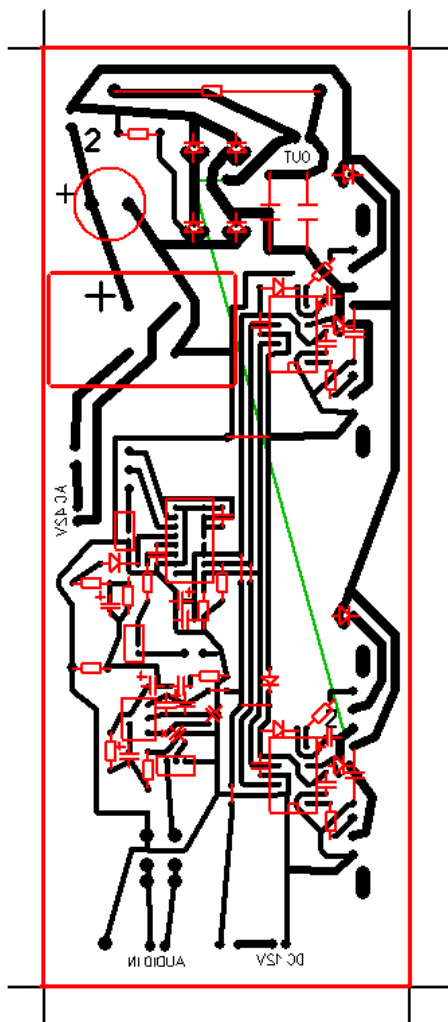


Верхняя часть трансформатора Тесла:  
тороид,  
угольный контакт,  
медный электрод,  
опорный диск

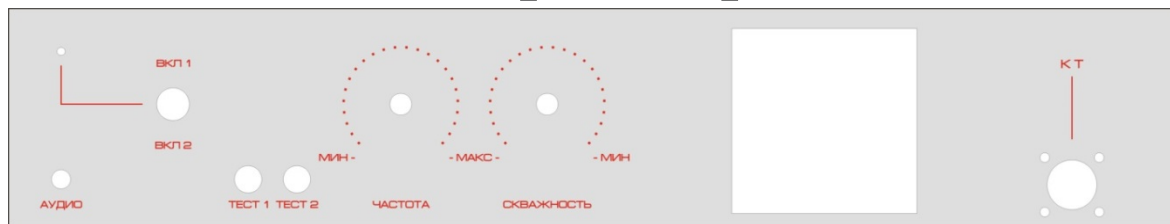


# МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ

## Методы и решения технологического проектирования



Макет печатной платы  
в Sprint Layout 5.0



Макет лицевой панели в CorelDRAW Graphics Suite 12



Фальшпанель, изготовленная на системе лазерной гравировки  
TROFTEC Speedy 100R



Самодельный намоточный станок

# МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ

## Методы обеспечения безопасности:

Негативный фактор	Метод устранения
Высокое питающее напряжение	Мостовой инвертор, ШИМ
Озон	Озоновый фильтр
ЭМИ	Клетка Фарадея
ЭМС	LC - фильтр
Высокое выходное напряжение	«Скин – эффект», высокая частота, электромеханический привод

Далее: экспериментальные исследования

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

## Исследование зависимости длины разряда от параметров КТ

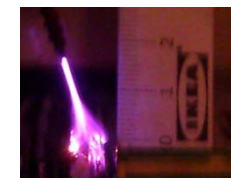
Количество витков	Длина разряда (мм)
3	9
5	12
7	18
9	20
11	23
13	22
15	22
17	21
19	19
21	18

Зависимость длины дугового разряда от количества витков первичной обмотки

Высота первичной обмотки (мм)	Длина разряда (мм)
10	20
20	20
30	20
40	21
50	23
60	22
70	21
80	21
90	20

Зависимость длины дугового разряда от взаимного расположения обмоток

Емкость вторичного контура КТ	Длина дугового разряда (мм)
Дополнительная емкость не подключена	10
Дополнительная емкость – тороид (диаметр трубы 120 мм, расстояние от верхнего конца вторичной обмотки – 0.9 м) подключен	12
Дополнительная емкость – тороид (диаметр трубы 120 мм, расстояние от верхнего конца вторичной обмотки – 50 мм) подключен	15
Нижний конец вторичной обмотки заземлен. Дополнительная емкость не подключена	15
Дополнительная емкость – клетка Фарадея (диаметр 0.7 м)	19



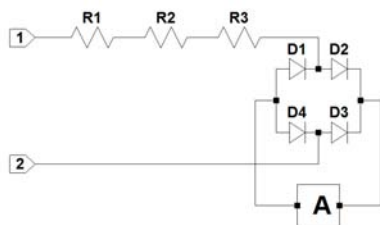
Зависимость длины дугового разряда от емкости вторичного контура

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

## Измерение выходного напряжения трансформатора Тесла



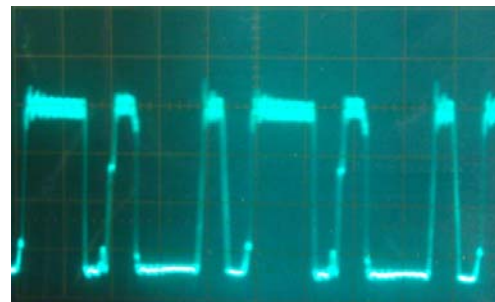
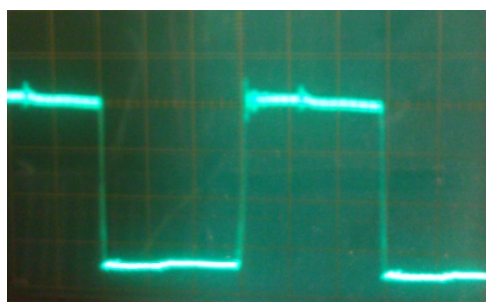
Самодельный  
киловольтметр



Частота тока, мкс ( $f_{рез} = 4;$ 5; 7; 10 мкс); разряд в КТ	Выходное напряжение, кВ
3; разряда нет	4
3.5; разряда нет	19
4; разряда нет	68
4.5; разряда нет	27
4; дуговой разряд	56

Зависимость выходного напряжения от  
различных параметров

## Исследование влияния вторичной обмотки на первичную



Сигнал на первичной обмотке КТ при работе на частоте, отличной от  
резонансной (слева), на резонансной частоте (справа)



# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

## Исследование параметров ЭМП трансформатора Тесла



Самодельная магнитная антенна

Положение антенны в пространстве	Эл. разряд	Напряжение на антенне	
Перпендикулярно окружности тороида в горизонтальной плоскости; в нижней части КТ	Дуговой		
Перпендикулярно окружности тороида в горизонтальной плоскости; в верхней части КТ	Дуговой		
По касательной к окружности тороида в горизонтальной плоскости; в верхней части КТ	Дуговой		
Перпендикулярно окружности тороида в вертикальной плоскости; в верхней части КТ	Дуговой		
По касательной к окружности тороида в горизонтальной плоскости; в верхней части КТ	нет		
По касательной к окружности тороида в горизонтальной плоскости; в верхней части КТ	Коронный		
По касательной к окружности тороида в горизонтальной плоскости; в верхней части КТ	Искровой		

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

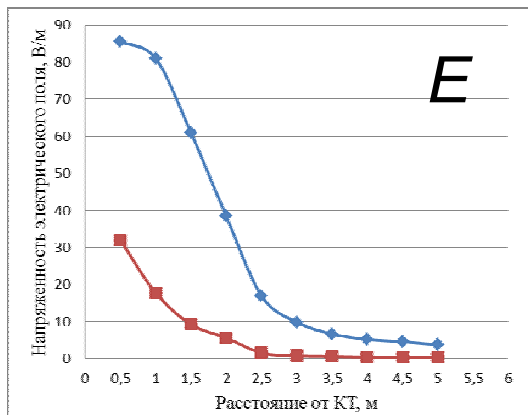
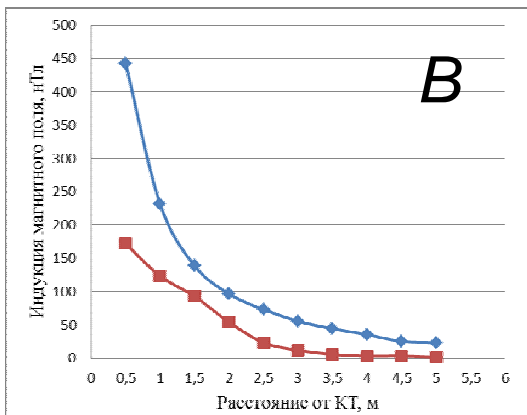
## Измерение периода гармоник и тока в первичной обмотке в различных режимах работы

Режим работы КТ	Ток в первичной обмотке КТ, А
Не в резонансе; нет электрического разряда	0.6
В резонансе; нет электрического разряда	1.4
В резонансе; дуговой разряд	2
В резонансе; искровой разряд	7

Режим работы КТ	Резонансный период (мкс)
11 витков первичной обмотки; клетка Фарадея	10; 7; <b>5</b> ; 4
3 витка первичной обмотки; клетка Фарадея	10; 7; <b>5</b> ; 4
11 витков первичной обмотки; нет дополнительной емкости	9; 6; <b>4</b> ; 3
11 витков первичной обмотки; подключен элемент для демонстрации эффекта Кирлиана	11; 7; <b>6</b> ; 5

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

## Исследование устройства в экспертной лаборатории



Расстояние от КТ, м	Инд. м. поля без клетки Фарадея, нТл	Инд. м. поля с клеткой Фарадея, нТл
0,5	443	172
1	232	123,5
1,5	139	102
2	96,7	54
2,5	73	23,3
3	55,48	12
3,5	44,1	5,6
4	35,33	3
4,5	25,2	3,2
5	23,19	1,3

Расстояние от КТ, м	Напр. эл. поля без клетки Фарадея, В/м	Напр. эл. поля с клеткой Фарадея, В/м
0,5	85,6	32
1	81	17,8
1,5	61	9,3
2	38,5	5,65
2,5	17	1,6
3	9,89	0,78
3,5	6,7	0,6
4	5,25	0,4
4,5	4,6	0,41
5	3,8	0,4

**ПРЕКТНО-ВИДЕРЕНЧЕСКИЙ ЦЕНТР**  
 Организация труда и экономического анализа

ИНН 0278154300  
 КПП 027801001  
 р/с: 4070281080705003907  
 в Кировском деп. офисе  
 ОАО «Сбербанк России» в Уфе  
 №: 3010181030000000738  
 БИК 040707389

450008, РБ, г. Уфа, ул. Кирова, 1  
 Тел. (947) 273-42-67, 286-80-12, 273-49-68  
[www.pv-center.ru](http://www.pv-center.ru)  
 E-mail: pvufa@mail.ru

Иск. № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ г.  
 № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ г.

**Акт технической экспертизы**

Сотрудникам лаборатории ООО «Пректно-видеренческий центр организации труда и экономического анализа» были проведены измерения параметров электромагнитного поля прибора.

Объект исследования: «Многофункциональное пособие по демонстрации физических явлений на основе трансформатора Тесла».

Инструментальные средства исследования: «Измеритель параметров ЭМП трёхкомпонентный ВЕ-метр АТ-003».

Место исследования: лаборатория ООО «Пректно-видеренческий центр организации труда и экономического анализа».

Исследуемые параметры ЭМП:  
 - напряженность электрического поля;  
 - индукция магнитного поля.

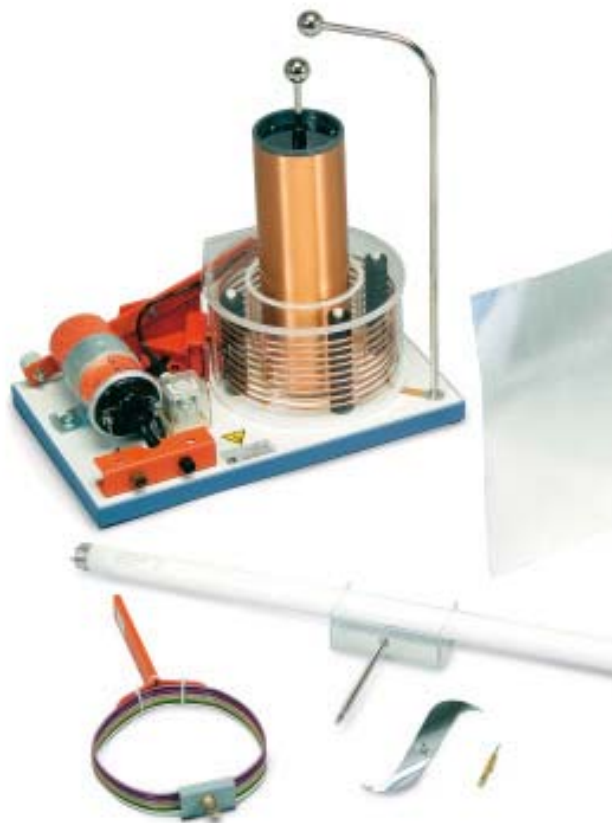
Результаты измерения значений параметров ЭМП в зависимости от расстояния до устройства представлены в таблице:

	0,5 м	1,0 м	2,0 м	3,0 м	4,0 м	5,0 м
Знач. маг. инд. без исп. клетки Фарадея, В (нТл)	443,5	232,2	96,7	55,4	35,3	23,1
Знач. напряж-ти эл. поля без исп. клетки Фарадея, Е (В/м)	85,6	81,0	38,5	9,89	5,25	3,8
Знач. маг. инд. с исп. клетки Фарадея, В (нТл)	172,0	123,5	54,0	12,0	3,0	1,3
Знач. напряж-ти эл. поля с исп. клетки Фарадея, Е (В/м)	32,0	17,8	9,3	5,6	0,8	0,4

Генеральный директор Р.Х. Рахмангулов

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

## Сравнение с аналогами



Учебный трансформатор Тесла  
3B Scientific (Германия)

<b>Tesla Transformer - 3B Scientific (Германия)</b>	<b>Многофункциональный прибор для демонстрации и изучения электрических</b>
<b>Универсальность явлений</b>	
8 опытов	15 опытов (минимум)
<b>Инвариантность</b>	
эл. Динамика	Электродинамика, химия, кв. мех.
<b>Возможность расширения функционала</b>	
нет	есть
<b>Стоимость</b>	
64 000	6 000 (только детали и материалы)
<b>Защита от ЭМИ</b>	
нет	есть
<b>Защита от озона</b>	
нет	есть
<b>Масса и габариты</b>	
3 кг; 330x200x120 мм	6,9 кг; 420x420x840 мм
<b>Электрическая безопасность</b>	
есть	есть
<b>Наглядность и зрелищность</b>	
есть	есть

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

## Результаты работы:

- Разработана, изготовлена и исследована демонстрационная установка по электродинамике, которая отвечает всем требованиям к учебному оборудованию, в том числе соответствующим СанПиН и ГОСТ
- Установка успешно апробирована на открытых уроках и региональных конференциях
- Разработано методическое пособие для работы с установкой

## Научная новизна:

- Комплексная адаптация трансформатора Тесла к учебному процессу
- Применение клетки Фарадея как дополнительной емкости вторичной обмотки трансформатора Тесла

## Практическая ценность:

- Устройство может использоваться в качестве демонстрационной установки в учебном процессе
- Устройство может использоваться для популяризации технических и естественнонаучных дисциплин