

УДК 53.07

## Применение резонансного трансформатора для изучения физики и химии

*Сафаров М.А., студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры»*

*Научный руководитель: Аитов И.Л., к.т.н, доцент*

*Россия, 450000, г. Уфа, УГАТУ*

*[iu4@bmstu.ru](mailto:iu4@bmstu.ru)*

### 1 Введение

*Современное состояние проблемы:* согласно современным исследованиям, в настоящее время демонстрационное и лабораторное оборудование, используемое в школах, в большинстве своем является для учащихся неинтересным и морально устаревшим [1].

*Актуальность* данной проблемы заключается в том, что это является одной из причин снижения интереса учащихся к естественнонаучным и техническим дисциплинам [2] и недостаточное понимание учебного материала вследствие невозможности изучения его на практике [3].

*Цель данной работы* - создание качественно новой демонстрационной установки по физике и химии на основе трансформатора Тесла.

Для этого в рамках работы проведены:

- математическое моделирование установки, в т.ч. с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР);
- схемотехническое, конструкторское и технологическое проектирования;
- изготовление действующей модели;
- экспериментальные исследования.

Особое место в работе уделено обеспечению безопасности устройства.

## 2 Математическое моделирование

### 2.1 Математическое моделирование без использования САПР

Трансформатор Тесла можно рассматривать как цепь с сосредоточенными параметрами [4, 5] и как цепь с распределенными параметрами [6-8]. Моделирование проведено на основе математического аппарата решений уравнений Максвелла для колебательного контура [9] и для спирального резонатора [10] соответственно.

В результате были определены предположительно наиболее оптимальные параметры разрабатываемого трансформатора: длина  $l_2 = 392,7$  мм, диаметр проводника  $d_{Cu} = 0.31$  мм, количество витков  $W_2 = 1267$ , индуктивность  $L_2 = 40,7$  мГн, емкость вторичной обмотки  $C_2 = 7,1$  пФ; емкость тороида  $C_{tor} = 11,649$  пФ.

### 2.2 Математическое моделирование с использованием САПР

Моделирование трансформатора Тесла как цепи с сосредоточенными параметрами проведено в САПР LTSpice (рис. 2.1).

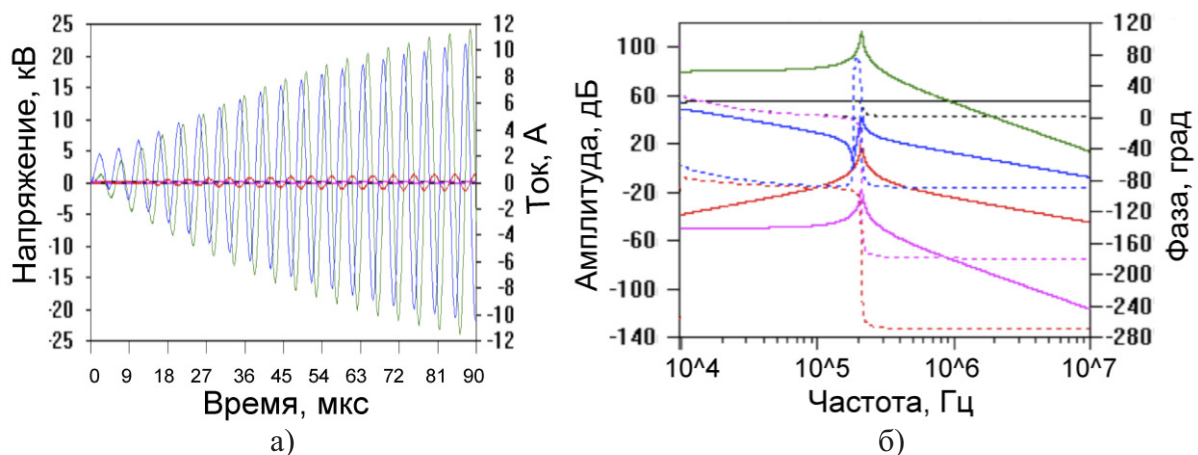


Рис. 2.1. а) временные диаграммы тока в первичной обмотке (синяя кривая), во вторичной обмотке (красная кривая), напряжения на первичной обмотке (черная кривая), вторичной обмотке (зеленая кривая); б) АЧХ (сплошные кривые) и ФЧХ (пунктирные кривые) токов в: первичной обмотке (синяя кривая), вторичной обмотке (красная кривая); напряжений на: первичной обмотке (черная кривая), вторичной обмотке (зеленая кривая)

Моделирование трансформатора Тесла как цепи с распределенными параметрами проведено в САПР INCA.

В результате были рассчитан предположительно наиболее оптимальный коэффициент связи между обмотками  $k = 0,203$ , определено вероятное выходное напряжение без учета интерференции.

Моделирование показало, что в трансформаторе Тесла образуются стоячие волны напряжения и тока, пучности которых находятся у верхнего и нижнего концов вторичной обмотки соответственно; а также то, что резонансная частота в катушке Тесла положительно коррелирует с коэффициентом связи между обмотками.

### 3 Проектирование и изготовление блока управления трансформатором Тесла

Первоначально была применена схема на основе полумостового инвертора и трансформаторной развязки [11] (рис. 3.1).

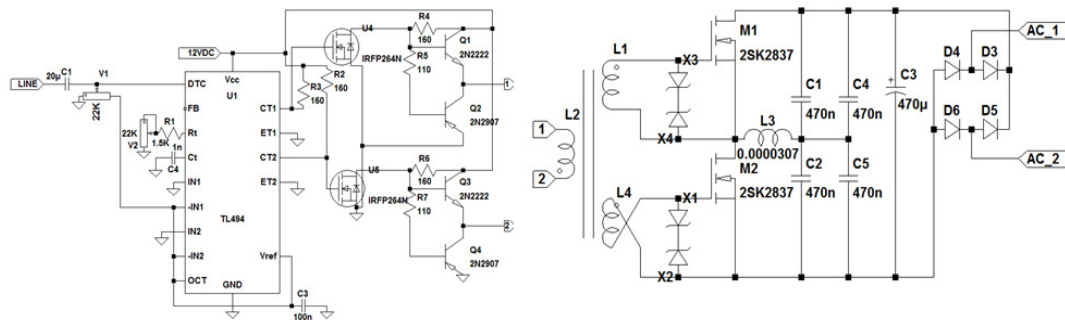


Рис. 3.1. SPICE модель первоначальной схемы блока управления трансформатором Тесла

В рамках работы данная схема прошла ряд усовершенствований, представленных далее.

- мощность схемы была увеличена за счет создания инвертора по топологии мост;
- устранение искажений ШИМ-сигнала осуществлено за счет применения интегральных драйверов затворов и бутстрепного каскада;
- существенное увеличение надежности прибора - устранение эффекта Миллера, тиристорного эффекта, влияния ЭМИ, защита от самоиндукции осуществлены использованием
  - диодов Шоттки;
  - сверхбыстрых диодов;
  - полевых транзисторов со сверхмалой емкостью затвор – сток и отсутствием

инжекции неосновных носителей в базовую область,;

- интегрирующих RC-цепей в цепи с затвором;
- уменьшением индуктивности цепи драйвер – затвор;
- также для этого было использовано аппаратное резервирование устройства;
- возможность быстрой точной настройки импульсов на резонансную частоту и регулировки скважности выходных импульсов аналоговым сигналом при неизменной несущей частоте обеспечена за счет применения интегральных ШИМ модулятора и предварительного усилителя;
- выбранная элементная база и оптимизация параметров трансформатора тесла позволили питать установку безопасным напряжением 42 В, что в комбинации с высокой частотой выходного напряжения делает прибор электрически безопасным [12, 13].

Результатом явилось создание блока управления, представленного на рис. 3.2.

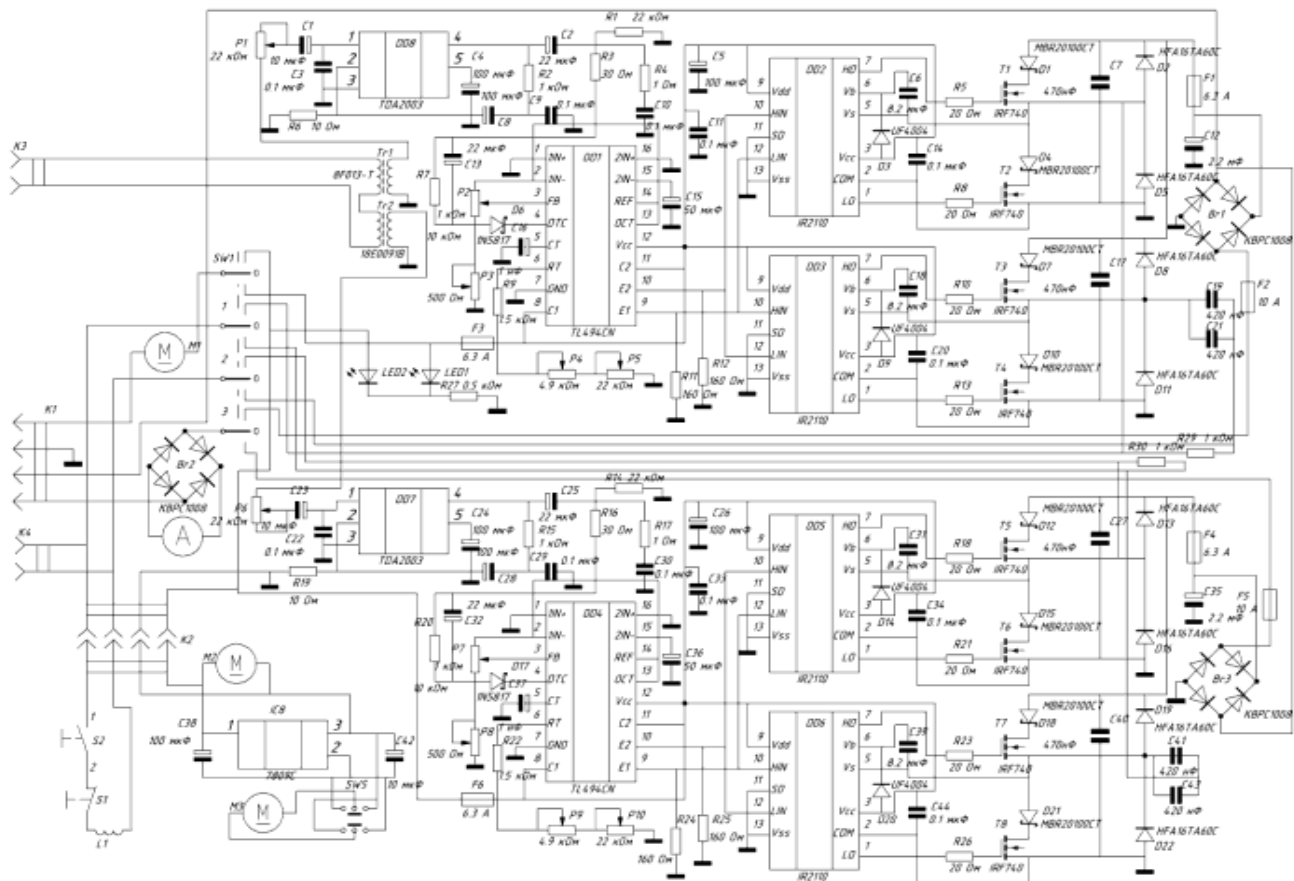


Рис. 3.2. Разработанная схема блока управления трансформатором Тесла

#### 4 Проектирование и изготовление демонстрационного блока

На основе результатов представленного в п.2 математического моделирования были созданы вторичная обмотка и тороид.

Для защиты от электромагнитного излучения (ЭМИ) вторичной обмотки вокруг нее коаксиально расположена токопроводящая поверхность (клетка Фарадея) (рис. 7.1).

Для обеспечения быстрой и безопасной демонстрации опытов спроектирована и изготовлена установка, отличающаяся тем, что демонстрационные модули установлены на вращающейся пластине, к которой прикреплен вал, приводимый в движение вручную или электродвигателем. Напряжение подводится к демонстрационным модулям посредством скользящего контакта с противоположной им стороны. Установка представлена на рис. 4.1, рис. 7.1.

Для регулировки коэффициента связи между обмотками создана конструкция, отличающаяся тем, что проводник первичной обмотки закреплен пластинами, имеющими отверстия, количество которых превышает количество витков. За счет этого возможно вертикальное перемещение первичной обмотки посредством её вращения. Для изменения количества активных витков использованы скользящие контакты. Конструкция изображена на рис. 4.1, рис. 7.1.

Для защиты от выделяющегося озона в устройстве применен озоновый фильтр (рис. 7.1), расположенный непосредственно над зоной его выделения.

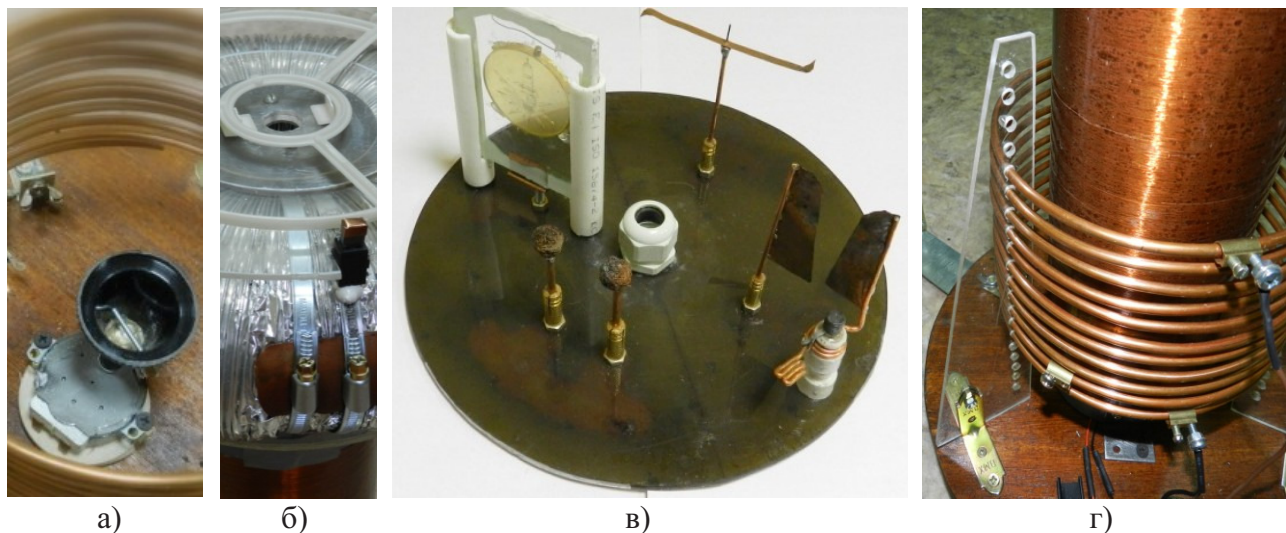


Рис. 4.1. а) электромеханический привод; б) скользящий контакт; в) пластина с элементами демонстрации; г) установка для регулировки параметров первичной обмотки

Для демонстрации и изучения различных физических явлений созданы элементы (модули) демонстрации, представленные на рис. 4.2.



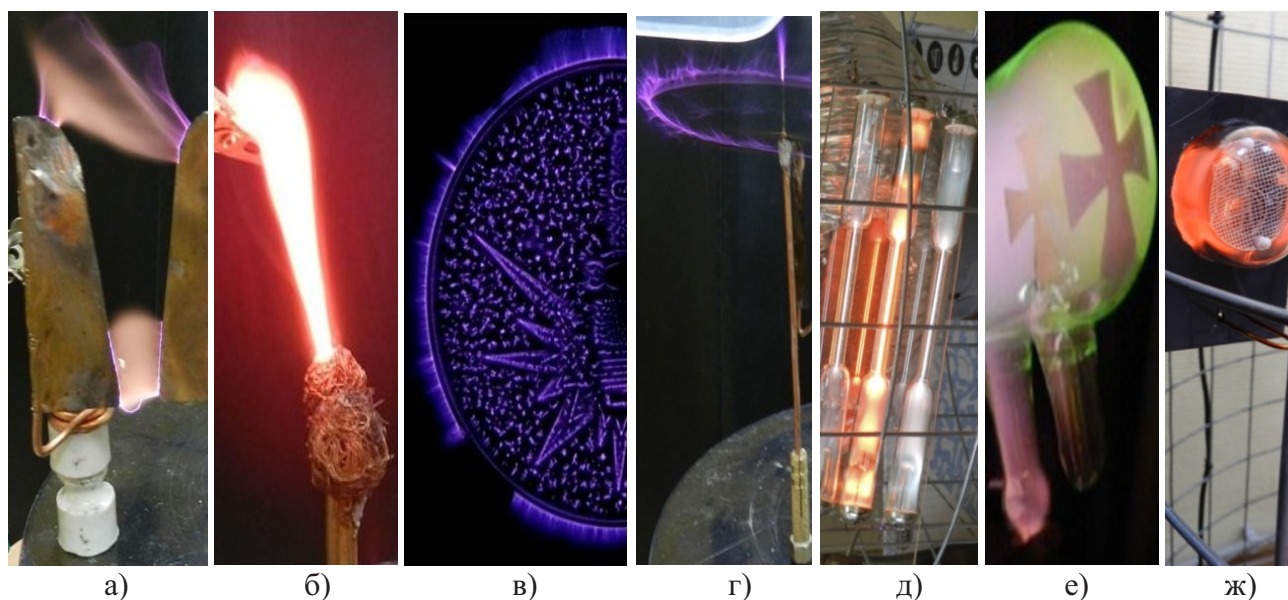


Рис. 4.2. Демонстрация физических явлений на созданных модулях: а) «лестница Иакова», б) окрашивание дугового разряда солями металлов, плазменный громкоговоритель, в) эффект Кирлиана, г) «ионный двигатель», д) свечение инертных газов в ЭМП, беспроводная передача энергии, е) движение эмитированных электронов, ж) стоячие волны напряжения

## 5 Экспериментальные исследования

### 5.1 Выходное напряжение

Измерения выходного напряжения проведены с помощью киловольтметра Phenix Technologies KVM100. Параметры первичной обмотки: расстояние между витками  $l_{Cu} = 10$  мм, диаметр обмотки  $D_{Cu} = 170$  мм.

Проведено исследование зависимости напряжения на вторичной обмотке  $V_2$  от частоты напряжения при различных коэффициентах связи между обмотками  $k$  (рис. 5.1, а). Значение  $k$  менялось путем изменения взаимного расположения обмоток.

Исследована зависимость  $V_2$  от количества витков первичной  $W_1$  при различных емкостях вторичного контура  $C_2$  (рис. 5.1, б).  $C_2$  изменялась подключением тороида ( $C_2 = 17$  пФ) и расположением коаксиально вокруг соединенной с нижним концом вторичной обмотки клетки Фарадея диаметром  $D_F = 510$  мм ( $C_2 = 31$  пФ).

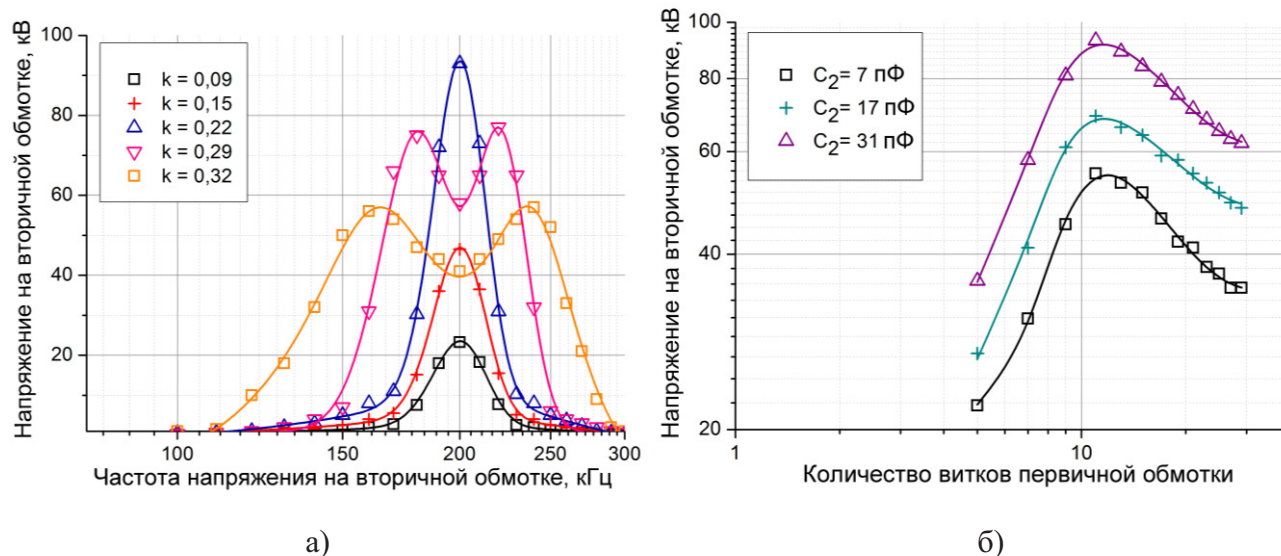


Рис. 5.1. а) зависимость напряжения на вторичной обмотке от частоты напряжения при различных  $k$ ; б) зависимость напряжения на вторичной обмотке от количества витков первичной при различных емкостях вторичного контура

Проведенные опыты показали, что  $V_2$  при резонансе многократно увеличивается; наиболее оптимальными параметрами в данной конфигурации трансформатора являются  $k = 0,22$  (разница в высоте первых витков обмоток  $l_{12} = 50$  мм) и  $W_1 = 11$ ; емкость вторичного контура положительно влияет на  $V_2$ , что означает, что соединенной с нижним концом вторичной обмотки клетки Фарадея позволяет существенно увеличить напряжение на вторичной обмотке.

В рамках исследования выдвинуты следующие гипотезы: положительная корреляция между  $C_2$  и  $V_2$  обусловлена накоплением большей энергии при образовании стоячих волн напряжения и увеличением добротности вторичного контура (при подтверждении последней будет решена одна из проблем составления мат. модели трансформатора Тесла – вторичный контур является параллельным).

Явление образования двух резонансных частот при коэффициенте связи больше  $k = 0,22$  еще не нашло объяснения у автора.

## 6 Электромагнитное поле

Измерения проводились с помощью трехкомпонентного измерителя параметров электромагнитного поля Narda NBM-520 при следующих параметрах трансформатора Тесла:  $l_{12} = 50$  мм,  $W_1 = 11$ ,  $l_{Cu} = 10$  мм,  $D_{Cu} = 170$  мм.

Проведено исследование зависимости напряженности электромагнитного поля  $E$  и индукции магнитного  $B$  от расстояния от начала вторичной обмотки при различных частотах  $V_2$  (рис. 6.1, а). Измерение проводилось на расстоянии 300 мм от вторичной обмотки.

Исследована зависимость  $E$  и  $B$  в зависимости от расстояния от вторичной обмотки (рис. 6.1, б) с применением клетки Фарадея и без.

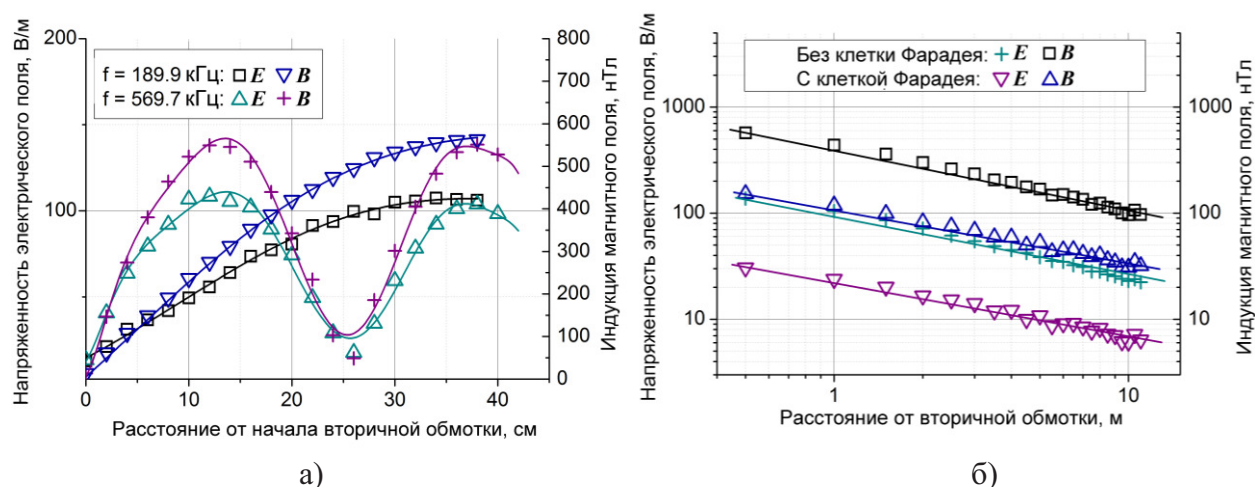


Рис. 6.1. а) Зависимость  $E$ ,  $B$  от расстояния от начала вторичной обмотки при различных частотах  $V_2$ ; б) зависимость  $E$ ,  $B$  в зависимости от расстояния от вторичной обмотки

Получены временные диаграммы напряженности электрического поля при различных частотах  $V_2$  (рис. 6.2).

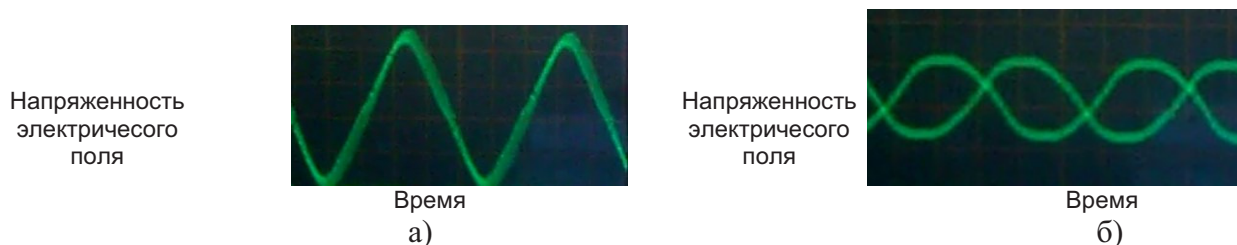


Рис. 6.2. Зависимость  $E$  от времени при а)  $f = 189,9$  кГц, б)  $f = 569,7$  кГц

Проведенные измерения показали, что напряженность поля вторичной обмотки распределена неравномерно (рис. 6.1, а). При  $f = 189,9$  кГц наблюдается максимум у верхнего



конца, при  $f = 569,7$  кГц – 2 максимума: на высоте  $l_2/3$  и  $l_2$ . Полученные временные диаграммы  $E$ , представленные на рис. 6.2 демонстрируют излучение вторичной катушкой двух противофазных волн при  $f = 569,7$  кГц. Это показало то, что во вторичной обмотке трансформатора Тесла происходит интерференция с образованием стоячих волн напряжения.

Также, наблюдалась отрицательная корреляция частоты гармоник с  $C_2$ , что косвенно подтверждает возможность моделирования вторичной обмотки в некоторых случаях как цепи с сосредоточенными параметрами.

Исследование, представленное на рис. 6.1 показало, что применение клетки Фарадея позволяет снизить уровень ЭМИ от трансформатора Тесла до безопасных значений [14-20].

## 7 Сравнение с аналогами

В рамках работы проведено сравнение с наиболее близким, по мнению автора, аналогом – учебным трансформатором Тесла компании «3B Scientific» (Германия).

Устройство, созданное в рамках данной работы, обладает значительным преимуществом по функциональности, универсальности, инвариантности, возможности расширения функционала, стоимости, защите от электромагнитного излучения и озона, но уступает аналогу по массе и габаритам.



а)



б)

Рис. 7.1. Внешний вид: а) действующая модель разработанного в рамках данной работы устройства, б) U8496250 Tesla Transformer (3B Scientific GmbH)

## 8 Выводы

Успешно проведены разработка, изготовление и исследование многофункциональной, зрелищной, безопасной и недорогой в производстве демонстрационной установки по физике и химии, которая отвечает всем требованиям, предъявляемым к современному учебному оборудованию, в том числе соответствующим международным стандартам [21-24].

Научная новизна работы:

- комплексная адаптация трансформатора Тесла для демонстрации и изучения множества физических явлений в учебном процессе;
- окружение вторичного контура трансформатора Тесла токопроводящей поверхностью и подключение ее к началу вторичной обмотки, что защищает от ЭМИ и значительно увеличивает выходное напряжение;
- создание автоматизированной револьверной установки дистанционной демонстрации опытов;
- создание конструкции для регулировки взаимного расположения обмоток трансформатора.

Практическая ценность созданного устройства заключается в том, что оно может использоваться в качестве демонстрационной установки в учебном процессе и для популяризации технических и естественнонаучных дисциплин.

## Список литературы

1. Jaakkola T., Nurmi S., Veermans K. A comparison of students' conceptual understanding of electric circuits in simulation only and simulation-laboratory contexts // Journal of Research in Science Teaching. 2011. № 48 (1). P. 71-93;
2. Deslauriers L., Schelew E., Wieman C. Improved learning in a large-enrollment physics class // Science. 2011. № 332 (6031). P. 862-864;
3. Csibra G., Gergely G. Natural pedagogy // Trends in Cognitive Sciences. 2009. № 13 (4). P. 148-153;
4. Peng J.-C., Liu G.-Z., Song X.-X., Su J.-C. A high repetitive rate intense electron beam accelerator based on high coupling Tesla transformer // Laser and Particle Beams. 2011. № 29 (1). P. 55-60;

5. Craven R.M., Smith I.R., Novac B.M. Optimizing the secondary coil of a tesla transformer to improve spectral purity // IEEE Transactions on Plasma Science. 2014. № 42 (1). P. 143-148;
6. Su J., Zhang X., Liu G., Peng J., Ding Z. A Long-Pulse Generator Based on Tesla Transformer and Pulse-Forming Network // IEEE Transactions on Plasma Science. 2009. № 37 (10). P. 1954-1958;
7. Tesla N. Electrical transformer: U.S. Patent No. 593138. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 1897. 5 p.;
8. Corum K.L., Corum J.F. RF coils, helical resonators and voltage magnification by coherent spatial modes // Microwave Review. 2001. № 7 (2). P. 36-45;
9. Gabelli J., Fève G., Berroir J.-M., Jin Y., Glatthli D.C. Violation of Kirchhoff's laws for a coherent RC circuit // Science. 2006. № 313 (5786). P. 499-502;
10. Cochran J.F., Heinrich B. Applications of Maxwell's Equations. Burnaby, B.C. (Canada): Simon Fraser University, 2004. 405 p.;
11. Pressman A. Switching Power Supply Design (2nd ed.). New York: McGraw-Hill, 1998. 682 p.;
12. Sweeney M.O., Sherfese L., DeGroot P.J., Wathen M.S., Wilkoff B.L. Differences in effects of electrical therapy type for ventricular arrhythmias on mortality in implantable cardioverter-defibrillator patients // Heart Rhythm. 2010. № 7 (3). P. 353-360;
13. Pliquett U.F., Zewert T.E., Chen T., Langer R., Weaver J.C. Imaging of fluorescent molecule and small ion transport through human stratum corneum during high voltage pulsing: localized transport regions are involved // Biophysical Chemistry. 1996. № 58 (1-2). P. 185-204;
14. Deno D.W. Currents induced in the human body by high voltage transmission line electric field. Measurement and calculation of distribution and dose // IEEE Transactions on Energy Conversion. 1997. № 96 (5). P. 1517-1527;
15. Schwan H.P. Interaction of Microwave and Radio Frequency Radiation with Biological Systems // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1971. № 19 (2). P. 146-152;
16. Alpen E.L. Radiation Biophysics. San Diego: Academic Press, 1997. 484 p.;

17. Zhang M., Li X., Bai L., Zhu H., Huang H. Effects of low frequency electromagnetic field on proliferation of human epidermal stem cells: An in vitro study // Bioelectromagnetics. 2013. № 34 (1). P. 74-80;
18. Jokela K, Puranen L, Gandhi OP Radio frequency currents induced in the human body for medium-frequency/high-frequency broadcast antennas // Health Physics. 1994. № 66 (3). P. 237-244;
19. Kirschvink J.L., Kobayashi-Kirschvink A., Woodford B.J Magnetite biomineralization in the human brain // Proc. Nat. Acad. Sci. 1992. № 89. P. 7683-7687;
20. Kirschvink J. L., Kobayashi-Kirschvink A., Diaz Ricci J.C., Kirschvink S.J Magnetite in human tissues: a mechanism for the biological effects of weak ELF magnetic fields // Bioelectromagnetics. Suppl. 1992. № 1. P. 101-113;
21. IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. New York: Institute of Electrical and Electronic Engineers, 1999. 83 p.;
22. International Labour Organisation Protection of workers from power frequency electric and magnetic fields. Geneva: International Labour Office, 1994. 89p.;
23. IEC 61010-1 Ed. 2.0 b:2001, Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use - Part 1: General requirements. Washington, DC: American National Standards Institute, 2007. 240 p.;
24. IEC 61326-1 Ed. 1.0 b:2005, Electrical equipment for measurement, control and laboratory use - EMC requirements - Part 1: General requirements. Washington, DC: American National Standards Institute, 2007. 46 p.