

УДК 621.3.051.025

А. В. Садовой, д-р техн. наук,  
И. А. Алексеев, канд. техн. наук

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАНСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В СИСТЕМЕ ОДНОПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

**Аннотация.** Представлена однопроводная резонансная система передачи электрической энергии с использованием трансформаторов Тесла. Применение такой системы позволит значительно сократить использование цветных металлов при передаче электрической энергии, так как возможна передача энергии по стальному проводнику, при одновременном улучшении электроэнергетических параметров в сравнении с традиционными двух-трех проводными.

**Ключевые слова:** резонансные системы передачи электрической энергии, трансформатор Тесла, лабораторная установка, экспериментальные исследования

A. Sadovoy, ScD.,  
I. Alekseev, PhD.

### EXPERIMENTAL RESEARCH OF PARAMETERS OF RESONANT TRANSFORMERS IN THE SYSTEM OF SINGLE-WIRE POWER TRANSMISSION

**Abstract.** The article considers information about single-wire resonance system electric power transmission using Tesla transformers. Using such a system will significantly reduce the use of non-ferrous metals in the systems transmission of electric energy with simultaneous improvement of electrical power parameters (efficiency more than 90%) in comparison with traditional two-three wires.

**Keywords:** resonance transmission systems of electric energy, the Tesla transformer, laboratory plant, experimental studies

А. В. Садовой, д-р техн. наук,  
И. А. Алексеев, канд. техн. наук

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЗОНАНСНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ У СИСТЕМІ ОДНОПРОВОДНОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

**Анотація.** Представлено однодротову резонансну систему передачі електричної енергії з використанням трансформаторів Тесла. Застосування такої системи дозволить значно скоротити використання кольорових металів при передачі електричної енергії, тому що можлива передача енергії по сталевому провіднику, при одночасному поліпшенні електроенергетичних параметрів у порівнянні з традиційними двох-трьох дротовими.

**Ключові слова:** резонансні системи передачі електричної енергії, трансформатор Тесла, лабораторна установка, експериментальні дослідження

**Введение.** Более ста лет назад Никола Тесла опубликовал результаты своих опытов по резонансному методу передачи электрической энергии [1, 2]. В начале двадцатого века не было современных электронных компонентов, а трехфазные сети, работающие с частотой 50 – 60 Гц, успешно справлялись с задачами по передаче энергии в диапазоне мощности от сотен ватт до тысяч мегаватт и на расстояние до 1000 км. Технологические потери на активных и реактивных сопротивлениях, коммуникационных и преобразующих устройствах при таком способе передачи электрической энергии составляют более 20 %.

Первым на территории СНГ однопроводную систему передачи электрической энергии внедрил «Газпром» (Россия) и спонсировал изготовление соответствующей установки мощностью 20 кВт [3].

Эксплуатация данной системы показала, что ее использование позволяет во много раз улучшить экономические и электрические показатели (КПД более 90 %) в сравнении с традиционными двух-трех проводными.

**Постановка задачи.** Основной задачей данной работы является анализ электрических, геометрических, частотных характеристик резонансных трансформаторов и основных закономерностей построения на их основе резонансных силовых сетей электропитания.

**Результаты работы.** На базе кафедры электро-механики Днепродзержинского государственного технического университета в лабораторных условиях была исследована однопроводная резонансная система передачи электрической энергии мощностью до 100 Вт.

В качестве передающего и принимающего трансформаторов в системе резонансной передачи электрической энергии использовались трансформаторы, изготовленные на пластиковых каркасах [4].

После проведенных теоретических и экспериментальных исследований получена универсальная схема резонансного трансформатора, показанная на рис.1. Для неё характерны следующие параметры: емкость и индуктивность первичной обмотки ( $C_1, L_1$ ); емкость и индуктивность вторичной обмотки ( $C_2, L_2$ ); активные сопротивления первичной и вторичной об-

моток  $R_1, R_2$ ; взаимная индуктивность между обмотками ( $M_{cb}$ ); взаимная емкость ( $C_{cb}$ ). Последний параметр, как правило, не учитывается в методиках расчета низкочастотных и импульсных трансформаторов, но необходим при расчете резонансного трансформатора, так как учитывает характер резонансных явлений между первичной и вторичной обмотками.

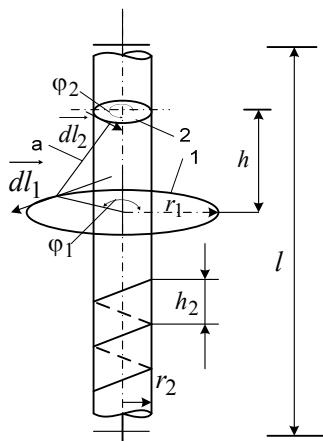


Рис. 1. Универсальная геометрическая модель

Собственные индуктивности первичной и вторичной обмоток рассчитывали по методике приведенной в [5], [6]. Взаимную индуктивность первичной и вторичной обмоток рассчитывали по формуле

$$M_{cb} = \mu_0 \int_0^\pi \sqrt{\frac{r_1 r_2 \cos \phi d\phi}{\left(\frac{l_1 - l_2 + h_{2(1)} - h_{2(2)}}{2} - x - h_{2(1)} k_1 + h_{2(2)} k_2\right)^2}} \Rightarrow \Rightarrow +r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi, \quad (1)$$

где  $r_1$  – радиус первичной обмотки,  $r_2$  – радиус вторичной обмотки,  $h_1$  – шаг намотки первичной обмотки,  $h_2$  – шаг намотки вторичной обмотки,  $l_1$  – длина намотки первичной катушки,  $l_2$  – длина намотки вторичной катушки.

Собственные емкости первичной и вторичной обмоток, а также емкость образованную совместно первичной и вторичной обмотками рассчитывали по методике указанной в [7]:

$$C_{cb} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot a_1}{\ln \frac{2 \cdot R}{a_2}}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная  $\varepsilon = 1$  – диэлектрическая проницаемость воздуха,  $a_2$  – радиус проволоки первичной обмотки,  $a_1$  – радиус вторичной обмотки.

В результате такого подхода резонансный трансформатор Тесла был представлен в виде системы передаточных функций  $W_i(p)$ , каждая из которых представляет собой колебательное звено с резонансной частотой, рассчитанной по формуле Томсона для возможных комбинаций  $C_i$  и  $L_i$  первичной и вторичной обмоток. Ширина частотных полос, количество резонансных частот расположенных в соответствующих полосах, и их суммарные энергетические показатели различны для первичной и вторичной обмоток

трансформатора Тесла. Это явление объясняется конструктивными особенностями трансформатора.

Экспериментальным путем установлено, что рабочая частота комплекса состоящего из двух резонансных трансформаторов Тесла и проводника соединяющего передатчик и приемник энергии, лежит в пределах 260 – 280 кГц в зависимости от длины проводника соединяющего передающий и принимающий трансформаторы. Рассчитанная по экспериментальным данным допустимая ошибка установки рабочей частоты комплекса не более  $\pm 100 \dots 150$  Гц ( $\Delta \ll 1\%$ ). Для достижения указанной точности установки частоты в работе используется метод прямого цифрового синтеза частоты DDS (DDS – direct digital synthesis). Непосредственно в качестве DDS-генератора используется чип AD9832, представляющий собой DDS-систему на базе КМОП элементов с тактовой частотой до 25 МГц. Сигнал с его выхода через цепи гальванической развязки поступает на драйвер MOSFET ключей полу-мостового инвертора (IR2111). В качестве центрального контроллера системы управления комплексом используется чип AT mega8 в типовом включении.

Таким образом, внешне простой по конструкции резонансный трансформатор Тесла, используемый в качестве передающего и принимающего устройства в системе резонансной передачи электрической энергии, представляет собой сложный объект управления с множеством дополнительных резонансных частот, что значительно усложняет задачу автоматического поиска и поддержания рабочей частоты комплекса.

### Выводы

1. Все множество резонансных частот системы однопроводной резонансной передачи электрической энергии может быть рассчитано исходя из геометрических параметров первичной и вторичной обмоток передающего и приемного трансформаторов Тесла.

2. Внедрение комплексов резонансной однопроводной передачи электрической энергии требует разработки методики идентификации и автоматического управления резонансными явлениями в системе.

### Список использованной литературы

1. Тесла Н. Статьи / Н. Тесла [наук. ред. В. Абрамович та ін.]. – Самара : издательский дом «Агни», 2008. – 584 с. : іл. – ISBN 978-5-89850-078-8.
2. Тесла Н. Колорадо-Спрингс. Дневники. 1899 – 1900 / Н. Тесла [наук. ред. В. Абрамович та ін.]. – Самара : издательский дом «Агни», 2008. – 460 с. : іл. – ISBN 978-5-89850-100-6.
3. Стребков Д. С. Резонансные методы передачи электрической энергии / Д. С., Стребков А. И. Некрасов : под редакцией академика РАСХН Д. С. Стребкова. 2-е издание. – М. : ВИЭСХ, 2006. – 304 с. – ISBN 978-5-85941-134-4.
4. Садовой А. В. Исследование параметров резонансных трансформаторов в системе однопроводной передачи электрической энергии / А. В. Садовой,

И. А. Алексеев, А. И. Трикило //Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету: (технічні науки) – Дніпродзержинськ : ДДТУ. – 2011. – Вип. 2(17). – С. 181 – 185.

5. Немцов М. В. Справочник по расчету катушек индуктивности / М. В. Немцов, Ю. М. Шамаев. Справочник по расчету катушек индуктивности.– М. : Энергоиздат, 1981. – 136 с., ил.

6. Калантаров П. Л. Расчет индуктивностей: Справочная книга / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. –3-е изд.; перераб. и доп. – Л. : Энергоатомиздат. Ленинградское отд-ние, 1986. – 488 с.: ил.

7. Иоссель Ю. Я. Расчет электрической емкости / Ю. Я. Иоссель, Э. С. Кочанов, М. Г. Струнский. – 2-е изд.; перераб. и доп. – Л. : Энергоиздат. Ленинградское отд-ние, 1981. – 288 с., ил.

8. Должиков В. В. Активные передающие антенны / В. В. Должиков, А. И. Лучанинов, С. Н. Сакало, П. Л. Токарский, Б. Г. Цыбаев, В. М. Шокало, А. А. Щербина. – М. : Радио и связь, 1984. – 144с., ил.

9. Мэк Р. Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению / Р. Мэк : пер. с англ. – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2008. – 272 с.: ил. ISBN 978-5-94120-172-3.

10. Алексеев И. А. Разработка принципиальной схемы интерфейса связи для систем управления на базе ПК типа IBM / И. А. Алексеев., М. В. Бабенко, А. Г. Беловицкий, Ю. А. Алексеева // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету: (технічні науки) – Дніпродзержинськ : ДДТУ. – 2010. – Вип. 2(15). – С. 81 – 86.

Получено 06.07.2014

#### References

1. Abramovich V. Tesla N. Stat'I [Tesla N. Articles], (2008), Moscow, Russian Federation, *Agni Publishing House*, 584 p. (In Russian).

2. Abramovich V. Tesla N. Kolorado-Springs. Dnevnik 1899 – 1900 [Tesla N. Kolorado-Springs. Diary 1899 – 1900], (2008), Moscow, Russian Federation, *Agni Publishing House*, 460 p. (In Russian).

3. Strebkov D.S. Rezonansnye metody peredachi elektricheskoi energii [Resonance Methods of Electric Power Transmission], (2008), Moscow, Russian Federation, 304 p. (In Russian).

5. Nemtsov M.V. Spravochnik po raschetu katushek induktivnosti [Reference Calculation Inductors], (1981), Moscow, USSR, *Energoizdat Publ.*, 136 p. (In Russian).

6. Kalantarov P.L. Raschet induktivnostei: Spravochnaya kniga [Calculation Inductances: Reference Book], (1986), Moscow, USSR, *Energoizdat Publ.*, 488 p. (In Russian).

7. Iossel' Yu.Ya. Raschet elektricheskoi emkosti [Calculation of Electric Capacitance], (1981), Moscow, USSR, *Energoizdat Publ.*, 288 p. (In Russian).

8. Dolzhikov V.V., Luchaninov A.I., Sakalo S.N., To-karskii P.L., Tsybaev B.G., Shokalo V.M., and

Shcherbina A.A. Aktivnye peredayushchie anteny [Active Transmitting Antennas], (1984), Moscow, USSR, 144 p. (In Russian).

9. Mek R. Impul'snye istochniki pitaniya. Teoreticheskie osnovy proektirovaniya i rukovodstvo po prakticheskomu primeneniyu [Switching Power Supplies. Theoretical Bases of Designing and Application Guidance], (2008), Moscow, Russian Federation, *Publishing House Dodeka XXI Publ.*, 272 p. (In Russian).

10. Sadovoi A.V., Alekseev I.A., and Trikiло A.I. Issledovanie parametrov rezonansnykh transformatorov v sisteme odnoprovodnoi peredachi elektricheskoi energii [Research of Parameters of Resonant Transformers in the System of Single-Wire Power Transmission], (2011), *Zbirnik Naukovikh Prats' Dniprodzerzhinsk'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu: (Tekhnichni Nauki)*, Dneprodzerzhinsk's, Ukraine, Vol. 2(17), pp. 181 – 185 (In Russian).

10. Alekseev I.A., Babenko M.V., Belovitskii A.G., and Alekseeva Yu.A. Razrabotka printsipial'noi skhemy interfeisa svyazi dlya sistem upravleniya na baze PK tipa IBM [Schematic Development Communication Interface for PC-Based Control Type IBM], (2010), *Zbirnik Naukovikh Prats' Dniprodzerzhinsk'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu: (Tekhnichni Nauki)*, Dneprodzerzhinsk's, Ukraine, Vol. 2(15), pp. 81 – 86 (In Russian).



Садовой

Александр Валентинович,  
д-р тех. наук, проф., проректор  
по научной работе Днепродзержинского государственного  
технического ун-та, Украина, Дне-  
продзержинск,  
ул. Днепростроевская, 2.  
Тел. 0569-551287.  
E-mail: sadovoy@dstu.dp.ua,



Алексеев

Игорь Анатольевич,  
канд. техн. наук, доц., докторант  
каф. электротехники и электро-  
механики Днепродзержинского  
государственного технич. ун-та.  
Украина, г. Днепродзержинск,  
ул. Днепростроевская.  
Тел. 2067-106-97-31.  
E-mail: akaseya@rambler.ru