

УДК 621.314.235.6

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ЭНЕР- ГЕТИКЕ И В ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРАХ

Комнатный Д.В., Зализный Д. И.
Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

В начале XXI века произошел всплеск интереса к наследию великого сербского электротехника Николы Тесла. Было опубликовано значительное количество преимущественно англоязычных работ, посвященных физико-математическому анализу и натурному моделированию трансформаторов Тесла различных конструкций.

Вместе с тем, вокруг идей, сформулированных Николой Тесла в его статьях и патентах на аппаратуру беспроводной передачи электроэнергии, в том числе построенный в лаборатории Вандерклифф передатчик, существует множество домыслов и противоречивых сведений. Так в русскоязычной научной печати и в средствах массовой информации периодически появляется информация об очередных разработках эзотерического характера, то есть разработках, не достаточно обоснованных теоретически и экспериментально. К ним относятся, прежде всего, нетрадиционные источники электроэнергии и резонансные системы передачи ее по однопроводным линиям и по свободному пространству.

Исходя из существующего состояния проблемы, в статье сформирован краткий обзор имеющегося в средствах научной информации материала по этим вопросам с учетом опыта работы авторов.

Значительное число публикаций на русском языке посвящено резонансным системам передачи электрической энергии по однопроводным линиям. В [1], [2] предлагается однопроводная система передачи электроэнергии на расстояние, в которой, как со стороны источника, так и со стороны приёмника подключены резонансные высоковольтные трансформаторы Тесла. Авторы утверждают, что электроэнергия в такой системе может быть передана с достаточной эффективностью без обратного провода, обосновывая физику электропередачи вихреобразной формой электромагнитного поля вокруг передающего провода. Однако в статьях не анализируются эффекты передачи части энергии через землю и ёмкости окружающих объектов. Также не описываются схемы и методы измерения передаваемой энергии в условиях высокой частоты и несинусоидальных токов и напря-

жений.

В [3] рассматривается эффект нагрева резистора, подключенного к однопроводной линии с трансформатором Тесла. Автор также не анализирует возможность передачи части энергии через землю и ёмкости окружающих объектов. Кроме того, не учитывается явление поверхностного эффекта при высокочастотном токе. Описанные недостатки присущи и публикации [4].

Возможности передачи электрической энергии по свободному пространству с помощью установок, предложенных в патентах Николы Теслы US 645 576 и US 1 119 732 и их аналогов, остаются практически не исследованными. До настоящего времени окончательно не выяснены ни принципиальная возможность передачи электрической энергии методами, описанными в этих патентах, ни вопросы практической реализации таких передач.

Итак, по мнению авторов, для полного научного обоснования эффективности передачи электрической энергии как по так называемым однопроводным резонансным линиям, так и по свободному пространству методами Николы Теслы, необходимо провести, в первую очередь, теоретические исследования частотного диапазона и волновых свойств аппаратуры передачи электроэнергии и натурные корректные измерения значений передаваемой активной мощности и КПД передачи.

В статье основное внимание уделено рассмотрению аппаратуры для беспроводной передачи электрической энергии, реализованной Н. Теслой в Колорадо-Спрингс и Вандерклифф, и ее современных аналогов. Согласно патентам US 645 576 и US 1 119 732 такие установки представляют собой мощный трансформатор Тесла, вторичная обмотка которого подключена кабелем к значительной емкостной нагрузке в форме тора, шара или эллипсоида. В современных конструкциях вторичная обмотка трансформатора Тесла рассматриваемого типа делается в виде очень высокой катушки, так что она выполняет роль линии подвода энергии к нагрузке, фидера (рисунок 1). Экс-

периментальная модель такого трансформатора имеется в лаборатории кафедры «Энергоснабжение» Гомельского государственного технического университета им П. О. Сухого (ГГТУ).

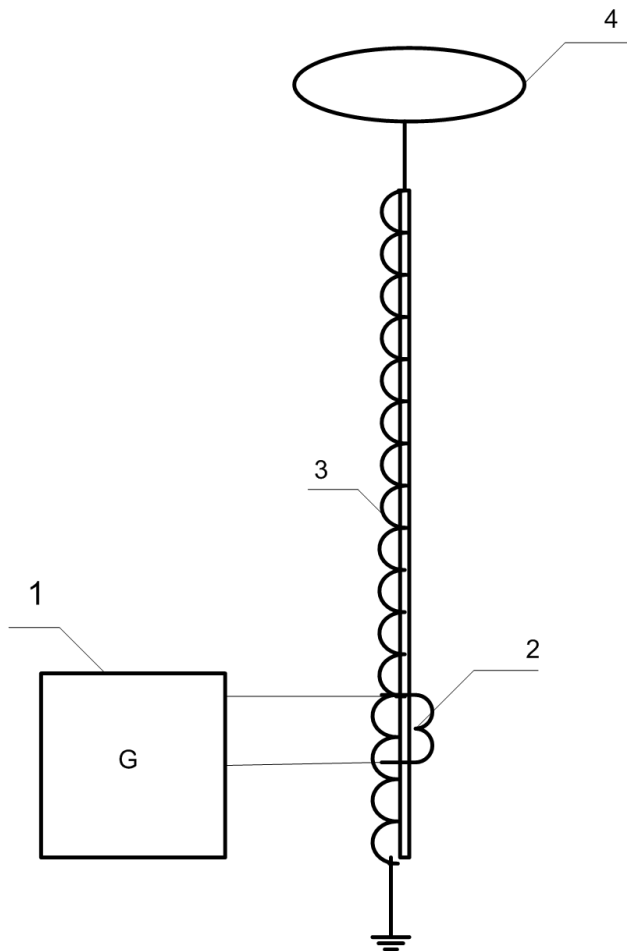


Рис 1. Конструкция трансформатора Тесла для исследования беспроводной передачи электроэнергии

1 – генератор колебаний; 2 – первичная обмотка; 3 – вторичная обмотка; 4 – емкостная нагрузка

Частотный диапазон, в котором работают описанные установки, обычно составляет десятки – сотни килогерц. Так в упомянутых выше патентах указаны длины волн, соответствующие 936 и 3747 Гц. Установка Николы Тесла в Колорадо-Спрингс по [5] работала на частоте 150 кГц, а по [6] на частоте 95 кГц. Установки, исследованные в [6] имели рабочие частоты 137, 478, 870, 900 кГц, а установки из [7] – 102 и 143 кГц. Трансформатор в лаборатории кафедры «Электроснабжение» ГГТУ имеет рабочую частоту 600 кГц. Таким образом, излучение беспроводных передатчиков электроэнергии, предложенных Николой Теслой и аналогичных им, попадает в диапазон длинных и сверхдлинных волн.

Особенности распространения этих волн по [8, 9] соответствуют результатам опытов Н. Тесла и его теоретическим концепциям [5]. Указанные волны распространяются по атмосферному волноводу «земля-ионосфера». При этом возникает эффект антипода – концентрация волн в точке земного шара, противоположной точке размещения излучателя. Возникают области резонансов Шумана. Источником таких волн могут быть молнии (эти волны называются атмосфериками) и искусственные разряды, которые были получены Н. Теслой в Колорадо-Спрингс. Часть длинных волн может проникать вглубь почвы и распространяться в ней с малым затуханием [10]. Конструкции антенн для излучения длинных волн [11] совпадают с конструкцией передатчика, построенного в городке Вандерклифф по патенту US 1 119 732. Самое примечательное в том, что с помощью длинных волн можно передавать энергию. Конкретным примером такой передачи энергии являются предложенные для радиолюбителей устройства питания радиоприемников за счет энергии длинноволновых излучателей. Если увеличить мощность излучения, то оказывается возможным включение ламп и моторов в опытах Н. Тесла [5].

Указанные обстоятельства побудили исследователей разрабатывать методы расчета и анализа процессов в высоковольтных высокочастотных трансформаторах Тесла достаточной для нужд энергетики мощности. Выбор методов расчета в современной теории электромагнетизма обуславливается частотой электромагнитных процессов. Для рабочих частот, указанных выше, достаточно приближение в виде модели линии с распределенными параметрами [12]. Трансформатор Тесла основан на периодическом заряде-разряде конденсатора, таким образом, в нем протекают переходные процессы. Поэтому для получения аналитического описания электромагнитных процессов в трансформаторе Тесла наиболее общей является операторная модель (рисунок 2). В этой модели при анализе авторских установок Николы Тесла L_2 и R_2 – омическое сопротивление и индуктивность вторичной обмотки трансформатора, соединенной с подводящим энергию к емкостной нагрузке кабелем. При анализе современных конструкций L_2 и R_2 – омическое сопротивление и индуктивность удлинительной катушки, присоединенной к вторичной обмотке трансформатора, которая одновременно является фидером для емкостной нагрузки [13]. Кабель и вторичная обмотка одинаковым образом моделируются длинной линией без потерь, работающей на емкостное сопротивление нагрузки. Уравнения электромагнитных процессов в такой линии записываются в

операторной форме [14, 15].

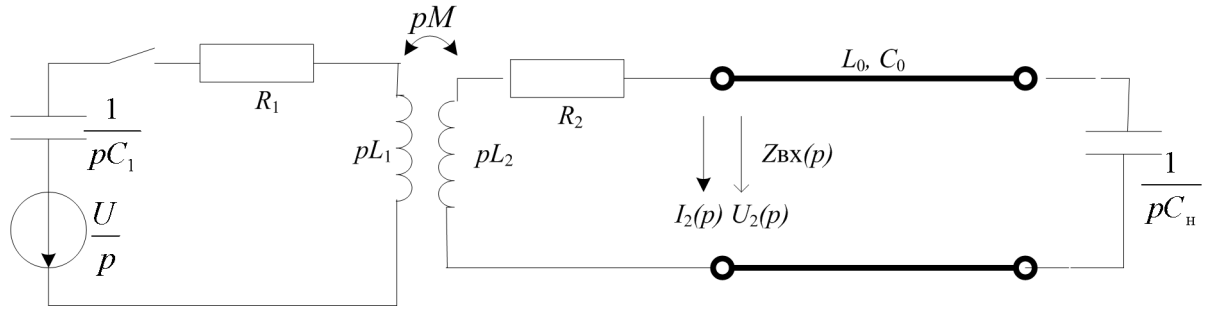


Рис.2 Операторная модель трансформатора Тесла для беспроводной передачи электроэнергии.

Таким образом, часть схемы замещения содержит цепь с сосредоточенными параметрами, а часть – с распределенными параметрами. Для согласования расчетов следует рассматривать переходные процессы в схеме с сосредоточенными параметрами, нагруженной на входное сопротивление длинной линии. Рассчитанное значение напряжения на входном сопротивлении, то есть в начале линии, определяет электромагнитные процессы в части схемы замещения с распределенными параметрами.

Для схемы замещения на рисунке 2 по законам Кирхгофа в операторной форме записывается система уравнений относительно неизвестных токов

$$\begin{cases} (pL_1 + R_1 + \frac{1}{pC_1})I_1(p) + pMI_2(p) = \frac{U}{p} \\ (pL_2 + R_2 + Z_{вх}(p))I_2(p) + pMI_1(p) = 0 \end{cases}$$

Ее решение [14]

$$\begin{aligned} I_1(p) &= \frac{U}{p} \frac{Z_2(p)}{Z_1(p)Z_2(p) - p^2 M^2} \\ I_2(p) &= \frac{-pMI_1(p)}{Z_2(p)}. \end{aligned}$$

Где обозначено

$$Z_1(p) = pL_1 + R_1 + \frac{1}{pC_1}, \quad Z_2(p) = pL_2 + R_2 + Z_{вх}(p).$$

Тогда напряжение на входе линии $U_2(p) = I_2(p)Z_{вх}(p)$.

Входное сопротивление линии без потерь, нагруженной на емкостное сопротивление (рисунок 2), вычисляется по формуле [15]

$$Z_{вх}(p) = Z_{в} \frac{1 + \Gamma(p)e^{-2pl/v}}{1 - \Gamma(p)e^{-2pl/v}},$$

где l – длина линии без потерь, м.

В этой формуле введены обозначения:

операторный коэффициент отражения от нагрузки

$$\Gamma(p) = -\frac{p - \frac{1}{C_{н}Z_{в}}}{p + \frac{1}{C_{н}Z_{в}}};$$

волновое сопротивление линии

$$Z_{в} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}};$$

скорость распространения сигнала в линии

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}.$$

Операторные выражения для распределения тока и напряжения по длине линии имеют вид [15]

$$\begin{aligned} U(p, x) &= U_2(p) \frac{e^{-\frac{px}{v}} + \Gamma(p)e^{-\frac{p(2l-x)}{v}}}{1 + \Gamma(p)e^{-\frac{2pl}{v}}}, \\ I(p, x) &= \frac{U_2(p)}{Z_{в}} \frac{e^{-\frac{px}{v}} - \Gamma(p)e^{-\frac{p(2l-x)}{v}}}{1 + \Gamma(p)e^{-\frac{2pl}{v}}}. \end{aligned}$$

Приведенные выражения показывают, что при расчете электромагнитных процессов во вторичной обмотке трансформатора и в линии без потерь необходимы трудоемкие математические выкладки. Для дальнейшего анализа требуется переход от изображений тока и напряжения в линии к оригиналам, сопряженный с математическими трудностями [14, 15]. Поэтому многие авторы разработали упрощенный подход к моделированию трансформаторов Тесла. В нем ограничиваются символическим методом расчета процессов в фидере, а процессы в трансформаторе исследуются классическим и операторным методами расчета переходных процессов [6, 7, 16, 17]. В указанных источниках принятые упрощения обоснованы и показано, что расчет на их основе имеет достаточную для практики точность.

К сожалению, вопрос об эффективности передачи энергии излучением исследован только в [6, 18]. Показано, что эффективность передачи энергии очень низкая (до 20 % по [18]). Этот вывод может быть подтвержден следующими соображе-

ниями. Известна формула для мощности, передаваемой излучением электромагнитных волн [9]

$$P_2 = P_1 \left(\frac{c}{4\pi f^2 r^2} \right) D_1 D_2$$

где P_1 – передаваемая мощность, Вт; P_2 – принимаемая мощность, Вт; c – скорость света, м/с; f – частота, Гц; r – расстояние, м; D_1 – коэффициент направленности передающей антенны, D_2 – коэффициент направленности приемной антенны.

Из формулы следует, что потери мощности возрастают при ненаправленной передаче ($D_1 = 1$), поэтому передатчики, предложенные Николой Тесла, сравнительно неэффективны. Работа опытных установок в Колорадо-Спрингс и Вандерклифф сопровождалась высокочастотными разрядами большой интенсивности [5], на создание которых энергия тратится непроизводительно.

При анализе возможности беспроводной передачи энергии с помощью трансформаторов Тесла необходимо учитывать, что они являются источниками мощных электромагнитных помех для электронного оборудования. В [6] показано, что спектр излучения трансформатора Тесла имеет ширину до 1000 кГц, является существенно негладким с значительными пиками и провалами. Такой спектр излучения и обуславливает высокий уровень помех. Это подтверждается опытом измерений в лаборатории кафедры «Энергоснабжение» ГГТУ. Установлено, что цифровые мультиметры при измерениях вблизи от лабораторного трансформатора Тесла выдают некорректные значения напряжений, работают нестабильно. На экране аналогового осциллографа наблюдаются идентичные формы сигнала напряжения на активном сопротивлении в непосредственной близости от трансформатора Тесла, как при подключенном к системе заземления сопротивлении, так и при его отключении от заземления. Таким образом, эксплуатация электронной техники, в том числе и выполнение измерений электронными приборами, для установок с высоковольтными высокочастотными трансформаторами сопряжена со значительными трудностями.

Следовательно, справедливо заключение исследовательского отчета армии США [7], что рассмотренные установки на базе трансформатора Тесла могут использоваться для разработки оборудования проведения испытаний на электромагнитную совместимость и для радиоэлектронной борьбы. Также они могут применяться для моделирования различных типов молний (линейных, шаровых, четочных) в целях их изучения и в целях испытаний технических средств на устойчивость к ним. В [19] изложен положительный опыт испытаний на электромагнитную совместимость крупных изделий аэрокосмической техники с помощью трансформаторов Тесла, конструкция которых аналогична патентам US 645 576 и US 1 119 732 Н. Тесла. Передача же электрической энергии крайне осложнена высоким уровнем возникаю-

щих при этом электромагнитных помех, что в современных условиях недопустимо.

Приведенные аргументы свидетельствуют и о том, что результаты опытов передачи энергии по однопроводным линиям и по свободному пространству, в том числе и приводимые в публикациях [1-4], могут оказаться некорректными по причине высокого влияния помех на измерительные приборы. Для полного обоснования эффективности подобных систем необходимо выполнить два условия:

- максимально отстроиться от электромагнитных помех, используя безэховые камеры и специальные экраны;
- проводить измерения передаваемой активной энергии методом осциллографирования, перемножая кривые напряжения и тока по мгновенным значениям, о чем говорится также в [6, 7, 18, 20].

Использование электромеханических измерительных приборов нельзя признать корректным из-за несинусоидальности токов в нагрузке.

Следует обратить внимание, что установки незначительной мощности в лаборатории не могут точно воспроизвести передачу энергии длинными электромагнитными волнами, так как работают в ближней зоне излучения [6].

По результатам выполненного анализа можно сделать вывод, что наиболее перспективно использование конструкций трансформаторов Тесла, первоначально разработанных для энергоснабжения, при разработке установок для испытаний на электромагнитную совместимость сложных изделий. Другие типы трансформаторов Тесла находят широкое применение в импульсной энергетике для получения чрезвычайно мощных (до 1014 Вт) импульсов электромагнитных излучений в диапазоне от радиоволн до рентгеновских лучей и электронных пучков [21]. Именно в этих областях усилия изобретателей и конструкторов, желающих развивать идеи Николы Тесла, могут принести значительные и практически востребованные результаты.

Список использованных источников

1. Алиев, И.И. Энергосберегающая резонансная однопроводная ЛЭП / И.И. Алиев // Энергоресурсосбережение и энергоэффективность. – 2011. – №6(42). – с. 27-30.
2. Алиев, И.И. Резонансная однопроводниковая линия электропередачи / И.И. Алиев, Д.С. Стребков // Электричество. – 2011. – №10. – с. 56-60.
3. Касьянов, Г.Т. Генерация тепловой энергии в однопроводной электросхеме / Г.Т. Касьянов // Современные наукоёмкие технологии. – 2011. – №2. – с. 36-39.
4. Стребков, Д.С. Электрооборудование для резонансной системы освещения / Д.С. Стребков

// Энергобезопасность и энергосбережение. – 2009. – №4(28). – с. 22-25.

5. Ржонницкий, Б. Н. Никола Тесла. Первая отечественная биография / Б. Н. Ржонницкий. – М.: Яуза Эксмо, 2009. – 256 с.

6. Graven, M. A study of secondary winding designs for the two-coil Tesla Transformer – Режим доступа <http://dspase.lboro.ac.dspace>. – Дата доступа 16.02.2019.

7. Corum, J., Daum J., Moor H. L. Tesla coil research – Режим доступа <http://www.dtic.mil/dtic/tr/> – Дата доступа 16.02.2019.

8. Альперт, Я. Л. Распространение низкочастотных электромагнитных волн в волноводе земля – ионосфера / Я. Л. Альперт, Э. Г. Гусева, Д. С. Флигель. – М.: Наука, 1967. – 123 с.

9. Грудинская, Г. П. Распространение радиоволн / Г. П. Грудинская – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1975. – 280 с.

10. Якубовский, Ю. В. Электроразведка / Ю. В. Якубовский. – М.: Недра, 1980. – 384 с.

11. Фрадин, А. З. Антенно-фидерные устройства / А. З. Фрадин. – М.: Связь, 1977. – 440 с.

12. Михайлов, В. А. Разработка методов и моделей анализа и оценки устойчивости функционирования бортовых цифровых вычислительных комплексов в условиях преднамеренного воздействия сверхкоротких электромагнитных излучений : автореф. дис. ... докт. техн. наук / НИУ ВШЭ . – М., 2014. – 45 с.

13. Рамлау, П. Н. Радиотехника / П. Н. Рамлау. – М.: Трансжелдориздат, 1957. – 302 с.

14. Конторович, М. И. Операционное исчисление и процессы в электрических цепях / М. И. Конторович. – 4-е изд. – М.: Советское радио, 1975. – 320 с.

15. Сборник задач по теоретическим основам электротехники / Л. А. Бессонов [и др.]; под ред. Л. А. Бессонова. – 3-е изд. – М.: Высшая школа, 1986. – 543 с.

16. Voitkans J., Voitkans A. Tesla coil theoretical model and experimental verification – Режим доступа <http://www.ece-journals.rtu.lv>. – Дата доступа 16.02.2019.

17. Blazevic, Z. Simple Transmission Line Representation of Tesla Coil and Tesla Wave Propagation Concept / Z. Blazevic, D. Poljak, M. Cvetkovic // Microwave Review – 2006. – № 1. – P. 55-58.

18. Yadav P. K. Design of Tesla coil and its uses in wireless power transmission (WPT) / P. K. Yadav, P. Sh. Chatterjee // International Journal of Latest Engineering and Applications – 2009. – Vol 2. № 6. – P. 7-10.

19. Golka R. K. Long arc simulated lightning attachment testing using 159 kW Tesla coil – Режим доступа <http://www.apps.dtic.mil>. – Дата доступа 16.02.2019.

20. Johnson G. L. Tesla coil Impedance – Режим доступа <http://educyclopedia.karadimov.info>. – Дата доступа 16.02.2019.

21. Месяц, Г. А. Импульсная энергетика и электроника / Г. А. Месяц. – М.: Наука, 2003. – 704 с.

**Международный
научно-практический
журнал**

«Изобретатель»

№ 4 (232) 2019

Учредители:
ОО «Белорусское
общество изобретателей
и рационализаторов»,
Учреждение «Редакция журнала
«Изобретатель»

Издатель:
Учреждение «Редакция журнала
«Изобретатель»

Главный редактор
Павел СТАСЕВИЧ

Распространение:
Республика Беларусь, Россия,
Украина, Казахстан, Германия,
Литва, Латвия, Болгария, Молдова.

Редакционная коллегия:
Владимир СКАКУН,
Владимир САМОЙЛОВ,
Олег ПОПОВ,
Андрей ЯНКОВИЧ

Материалы публикуются
на языке авторов.

За достоверность информации, опубликованной
в рекламных материалах, редакция
ответственности не несет. Полное или
частичное воспроизведение или размножение
любым способом оригинальных материалов,
опубликованных в настоящем издании, допускается
только с письменного разрешения редакции.
Мнения, высказанные в материалах журнала, не
обязательно совпадают с точкой зрения редакции.
В номере использованы статьи из интернет-
источников, газеты "Республика". Материалы,
опубликованные в журнале, редакция имеет право
использовать в Интернет-сети.
Рукописи не возвращаются.
Подписан в печать 24.04.2019 г.
Формат издания 60x84 1/8.

Тираж 400 экз.
Цена свободная.
Заказ №

Адрес для писем:
220012, г. Минск,
ул. К. Чорного, 4.
+375 (17) 292-43-85,
+375 (17) 203-85-40,
Тел./факс +375 (17) 292-52-92.

E-mail: izobretatel1@yandex.ru

Подписные индексы:

748962 (для ведомств и организаций),
74896 (для индивидуальных подписчиков).

Отпечатано в ЧПТУП "Колорград"
ЛП № 02330/474 от 08.09.2015
220033, г. Минск, пер. Велосипедный, 5, офис 904
www.сегмент.бел

© «Изобретатель», 2019