

МОДЕЛЬ ГЛОБАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ. ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ

Легович Ю.С.¹, Максимов Д.Ю.², Максимов Ю.В.³

*(Учреждение Российской академии наук
Институт проблем управления РАН, Москва)*

Рассматривается принципиальная возможность использования для беспроводной передачи энергии глобального резонатора ТЕМ волны, образованного идеализированными поверхностями Земли и ионосферы. Для выбранной схемы цепей согласования резонатора с источником энергии и нагрузкой определена частотная характеристика системы и получены оценки требуемых значений добротностей ее элементов. Установлено, что рассмотренная система чрезвычайно узкополосна и при реализации потребует принятия специальных весьма серьезных мер по уменьшению потерь в элементах системы, а также высокоточной синхронной настройки цепей согласования источника и нагрузки с резонатором, которую невозможно реализовать без наличия специальной системы управления и каналов связи между пунктами передачи и приема энергии.

¹ Юрий Сергеевич Легович, кандидат технических наук, зав. лабораторией (Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, тел. (495) 334-93-61)

² Дмитрий Юрьевич Максимов, научный сотрудник (phoenixjhanjaa@yandex.ru).

³ Юрий Викторович Максимов, вед. инженер (Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, тел. (495) 334-87-21).

Ключевые слова: беспроводная передача, передача энергии, глобальный резонатор, волновод Земля-ионосфера.

1. Введение

Стимулом к проведению исследования, результаты которого излагаются в данной статье, послужили многочисленные спекуляции, появившиеся в околوناучной прессе вокруг работ выдающегося инженера и ученого конца 19-го-начала 20-го веков Николы Теслы. Из публикаций, касающихся научных интересов Н. Теслы, следует, что идея использования свойств Земли и ионосферы для беспроводной передачи электрической энергии в глобальном (планетарном) масштабе не оставляла его до конца жизни [3]. Весьма красочны описания экспериментов Н. Теслы, проводимых им в начале 20-го столетия в Лонг-Айленде с использованием разработанного им же мощного источника электрической энергии, излучаемой устройством, установленным в так называемой Уордерклиффской башне [3]. Однако, сколько-нибудь достоверных сообщений о том, где и как принималась эта энергия, в этих публикациях нет. Как нет недостатка и в различного рода гипотезах и домыслах по этому вопросу и другим аспектам многочисленных экспериментов и демонстраций ученого, связанных с электрическими явлениями.

Оставляя в стороне все многообразие интересов Н. Теслы, кроме проблемы беспроводной передачи электрической энергии, основанной на использовании свойств глобального резонатора, образованного поверхностью Земли и ионосферой, уточним постановку вопроса следующим образом.

2. Постановка задачи

Цель исследования состояла в том, чтобы определить принципиальную возможность беспроводной передачи электрической энергии без существенных потерь из одной «точки» (от

некоторого источника, расположенного в одном месте) глобального сферического концентрического резонатора ТЕМ волны (с идеализированными характеристиками) в другую «точку» (некоторому потребителю, расположенному в другом произвольном месте резонатора). Термином «глобальный» определяются размеры резонатора, которые должны соответствовать размерам Земли и ионосферы. Идеализация характеристик резонатора заключается в том, что его поверхности считаются идеальными концентрическими сферами достаточно высокой проводимости, настолько высокой насколько это необходимо для передачи энергии без существенных потерь.

Необходимо отметить, что в такой постановке вопроса речь идет о передаче энергии ограниченной мощности, т.е. о передаче энергии такого уровня, при котором не происходит ионизации воздуха, приводящей к образованию «молний», а значит и к дополнительным потерям. В таком аспекте, насколько известно, Н. Тесла вопрос не рассматривал.

При расчете характеристик такой системы представляется целесообразным комплексные сопротивления источника и нагрузки (включая цепи согласования) считать одинаковыми, а при выборе электрической схемы цепей согласования ориентироваться на схему, предложенную Н. Теслой [3]. Естественно, целью исследования было оценить проблемы реализации такой (пусть даже идеализированной) глобальной системы беспроводной передачи энергии.

3. Подход к решению задачи

Прежде всего, отметим очевидную целесообразность использования (для передачи энергии) электромагнитной волны основного типа, поскольку потери энергии в этом случае будут минимальными (если исключить возможность образования высших типов волн) [1]. Для рассматриваемого резонатора

основным типом волны будет поперечная ТЕМ волна и высшие типы волн не будут возникать (не могут существовать), если длина возбуждаемой волны, по крайней мере, вдвое превышает расстояние от поверхности Земли до проводящего слоя атмосферы (т.е. до ионосферы). Строго говоря, сказанное будет в полной мере справедливо для линий (волноводов) с плоскими параллельными проводящими поверхностями (например, для радиальной линии) [5]. Однако, если радиус кривизны проводящих поверхностей велик по сравнению с длиной волны, то конфигурация поля в таких «искривленных» волноводах сохраняется такой же, какой она была в волноводе с плоскими (не искривленными) проводящими поверхностями [1]. Поскольку расстояние от Земли до ионосферы составляет порядка (60 – 90)км, то длина возбуждаемой волны не должна быть меньше примерно 200км, чтобы в нашем резонаторе не возникали волны высших типов, и в то же время длина волны должна быть как можно меньше по сравнению с радиусом кривизны проводящих поверхностей. Таким образом, чтобы обеспечить справедливость предлагаемого подхода к рассмотрению обозначенной проблемы длина волны, используемой для передачи энергии, в нашем случае должна быть не намного больше граничного (критического с точки зрения возникновения волн высших типов) значения, определенного выше (200км). В наших расчетах мы принимали частоту сигнала (волны) равной 1,2кГц (что соответствует длине волны 250км) и считали, что расстояние между концентрическими поверхностями резонатора равно 70км (при радиусе внутренней сферы 6370км).

На рисунке 1 показана структура глобальной системы передачи энергии, использующей резонатор Земля – ионосфера, представленная сечением в экваториальной плоскости, проходящей через источник и нагрузку. На этом рисунке схематически изображены также устройство возбуждения резонатора (предложено Н. Теслой) и аналогичное по схеме устройство связи резонатора с нагрузкой. Стрелками показаны направления распространения возбуждения (в представленном сечении).

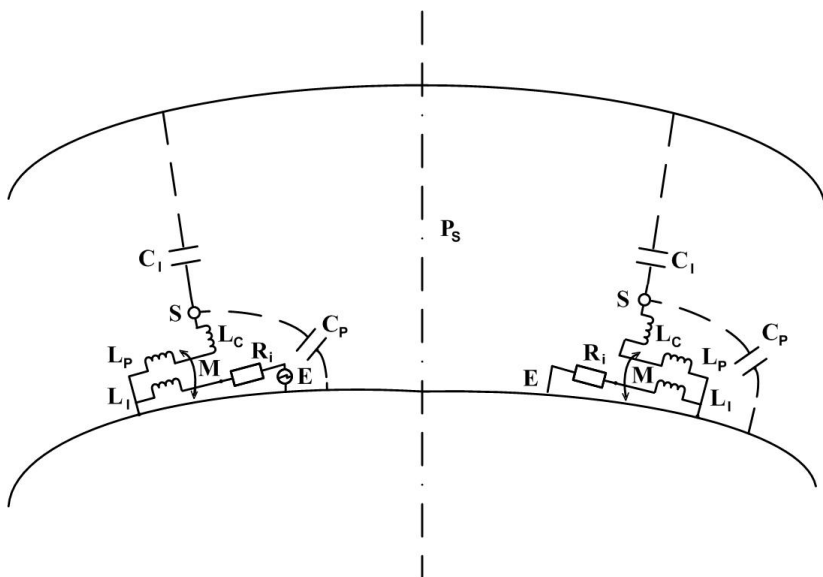


Рис. 1. Структура глобальной системы беспроводной передачи энергии

На рисунке введены следующие обозначения:

E_1 – ЭДС источника сигнала, поступающего на согласующую цепь устройства возбуждения;

R_i – внутреннее сопротивление источника;

L_1 , L_P , M , L_C – элементы цепей согласования источника и нагрузки с резонатором;

S – элемент связи цепи согласования с резонатором;

C_1 – емкость между элементом связи S и ионосферой;

C_P – емкость между элементом связи S и Землей;

R_L – сопротивление нагрузки;

P_s – плоскость симметрии.

На рисунке 2 показана эквивалентная схема рассматриваемой системы, на которой изображен резонатор R_w (в виде симметричного четырехполюсника), к которому через емкости

связи C_1 и цепи согласования подключены источник (с одной стороны) и нагрузка (с другой).

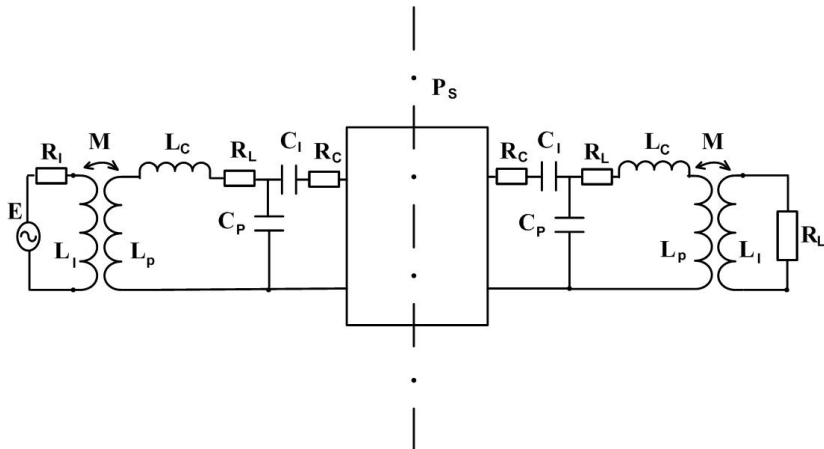


Рис. 2. Эквивалентная схема глобальной системы беспроводной передачи энергии

Введением в эквивалентную схему активных сопротивлений r_c и r_L учитываются потери в системе, возникающие за счет конечной проводимости проводящих поверхностей (Земли и ионосферы) и индуктивных элементов цепи согласования.

Учет распределенных потерь путем введения в схему сосредоточенных омических сопротивлений часто применяется в случаях, когда потери невелики. И в данном случае такой прием вполне оправдан, прежде всего, в силу предъявляемого к системе требования обеспечить передачу энергии без существенных потерь (система с существенными потерями просто не приемлема). Кроме того, из физических соображений ясно, что сопротивление участков проводящих поверхностей Земли и ионосферы в областях связи резонатора с источником и нагрузкой составляет основную долю их общего сопротивления (по причине ограниченности поперечных размеров этих областей).

Представленная на рисунке 2 эквивалентная схема отражает структуру модели глобальной системы беспроводной передачи

энергии. Остается определить параметры этой модели и описать ее действие. Задача, при этом, сводится к анализу некоторого симметричного четырехполюсника эквивалентного глобальному резонатору и определению значений элементов цепи согласования, при которых обеспечивается приемлемый уровень потерь энергии. Необходимо также описать частотные свойства рассматриваемой системы при выбранных значениях элементов цепи согласования и вычисляемых значениях емкостей C_1 и C_p .

4. Результаты анализа модели

Принимая во внимание, что упомянутый четырехполюсник представляет собой некоторую неоднородную линию передачи (хотя и несколько своеобразную), для описания его свойств использовалась матричная форма записи с определением элементов матрицы передачи путем решения соответствующих дифференциальных уравнений [2]. Так как система имеет плоскость симметрии (P_S), то для расчета частотных характеристик использовался метод зеркальных изображений (называемый также методом последовательных синфазных и противофазных возбуждений) [3].

Для решения задачи была разработана специальная программа. Расчеты выполнены в предположении, что элемент связи S имеет сферическую форму (диаметром D_S), а емкость катушки индуктивности на Землю в заданное число раз (K_C) превышает емкость вертикального провода заданного диаметра и длиной, равной высоте подвеса сферы S . Данные предположения приняты только с целью конкретизации расчетов и принципиального значения не имеют.

Вводными данными для программы расчета являются:

F – частота сигнала (выбрана равной около 1,2кГц);

L_N – минимальное расстояние между источником и нагрузкой;

D_S , H_S – диаметр и высота подвеса сферы S соответственно;
 D_L – диаметр провода катушки индуктивности L_C ;
 K_P – коэффициент передачи системы по мощности;
 K_C – отношение емкости катушки индуктивности L_C на Землю к емкости на Землю одиночного вертикального провода диаметром D_L и длиной H_S ;
 H_I – высота ионосферы.

Результатами расчета являются частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи системы по мощности (K_R и K_P соответственно), а также значение добротности катушки индуктивности Q_L , отражающей потери проводимости катушки, и значение «добротности области связи» Q_C , отражающей потери проводимости области связи. В результате расчета определяются также значения и других параметров цепи согласования.

На рисунках 3, 4 и 5 представлены результаты расчетов модели без потерь – пунктирные линии и модели с потерями ($K_P=0,9$ и K_R - не более 0,01) – сплошные линии. Расчеты выполнены для сферы диаметром 20м и 30м при высоте подвеса сферы 280м и 560м и расстоянии между источником и нагрузкой 2000км.

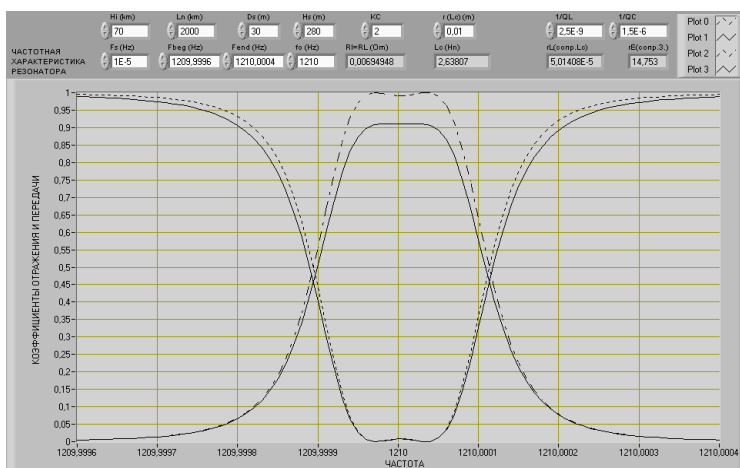


Рис. 3. Частотные характеристики модели при $D_S=30\text{м}$ и $H_S=280\text{м}$

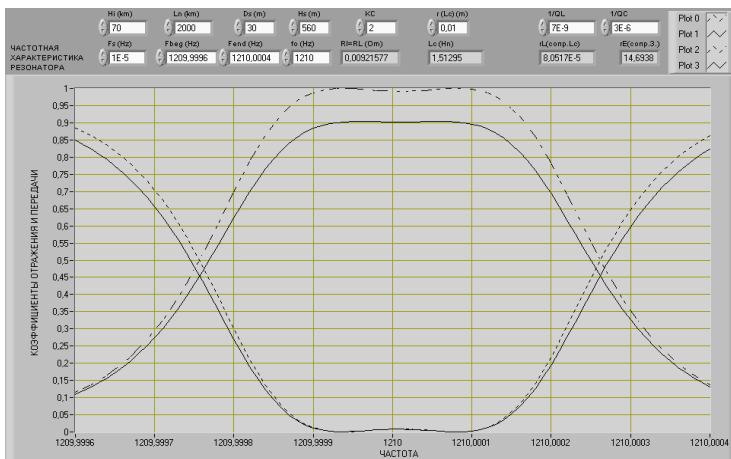


Рис. 4. Частотные характеристики модели при $D_S=30\text{м}$ и $H_S=560\text{м}$

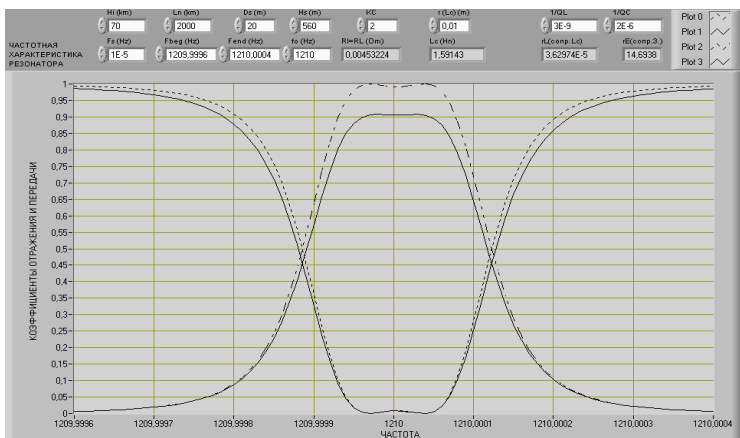


Рис. 5. Частотные характеристики модели при $D_s=20$ м и $H_s=560$ м

Результаты расчетов для указанных входных данных представлены также в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчета модели

Вводные данные		Результаты расчета		
Диаметр сферы (м)	Высота подвеса сферы (м)	Относительная полоса пропускания (ед.)	Добротность катушки (ед.)	Добротность области связи (ед.)
30	280	$0,67 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^8$	$6,7 \cdot 10^5$
30	560	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^8$	$3,3 \cdot 10^5$
20	560	$0,8 \cdot 10^{-7}$	$3,3 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^5$

5. Обсуждение результатов

В результате анализа предложенной модели глобальной системы беспроводной передачи энергии получены оценки значений параметров основных элементов системы, при дости-

жении которых в принципе могла бы действовать такая система. При этом ее характеристики могут быть рассчитаны. Однако полученные расчетные значения указанных величин объясняют всю сложность проблемы реализации такой системы (при выбранной схеме согласующей цепи, размерах и высотах подвеса сферы S).

Что касается элементов, обеспечивающих связь глобального резонатора с источником энергии и нагрузкой, то следует отметить две группы факторов, влияющих на характеристики системы.

Во-первых, это геометрия устройства связи: размер сферы, завершающей «башню Теслы», и высота этой башни.

Во-вторых, электрические характеристики элементов устройства связи.

В опытах Н. Теслы использовалась башня высотой около 60м с куполом диаметром порядка 20м. В наших расчетах мы увеличили высоту подвеса сферы до 560м и диаметр сферы до 30м. Тем не менее, получены весьма критические значения электрических характеристик элементов цепи согласования и области связи: для обеспечения передачи 90% энергии добротность катушки индуктивности должна быть $(1,4 - 4) \cdot 10^8$ (при этом омическое сопротивление провода катушки составляет $(3,6 - 8) \cdot 10^{-5}$ Ом), а «добротность области связи» должна быть $(3,3 - 6,7) \cdot 10^5$ (что соответствует некоторому эквивалентному сопротивлению примерно 14,7 Ом). Для достижения таких значений сопротивления провода катушки, по всей видимости, потребуются применение специальных мер, вплоть до глубокого охлаждения катушки (детальные расчеты не проводились). Внимательного изучения потребует и вопрос обеспечения требуемой «добротности области связи».

Наиболее же сложной представляется проблема обеспечения точной (и синхронной) настройки системы в резонанс (и в пункте передачи, и в пункте приема энергии), а также проблема поддержания системы в состоянии резонанса при воздействии различных внешних факторов. Без прецизионной распределен-

ной системы управления с надежными каналами связи пунктов передачи и приема, по всей видимости, здесь не обойтись. И все эти проблемы должны решаться в комплексе для каждого конкретного случая.

В связи со сказанным представляется целесообразным провести поиск другой схемы обеспечения связи источника и нагрузки с глобальным резонатором, более пригодной для реализации (такой поиск в настоящее время проводится).

В заключение отметим, что может представить интерес случай, когда не требуется столь высокий коэффициент передачи системы по мощности. При этом естественно можно ожидать снижения требований к элементам системы и точности настройки. Вопрос – насколько? Этот случай нами не исследовался. Чтобы ответить на поставленный вопрос потребуется внести определенные коррективы в программу.

Литература

1. МЕЙНКЕ Х., ГУНДЛАХ Ф.В. *Радиотехнический справочник*. – Москва.: Госэнергоиздат, –1961. – 416 с.
2. САЛИЙ И.Н. *Нерегулярные линии передачи* // Учебное пособие для студентов специальностей 0138006 071500 – «Радиофизика и электроника», 200700 – «Радиотехника», 511500 «Радиофизика». Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского. –1965.
3. ТЕСЛА Н. *Статьи* // Самара: Издательский дом «Агни». – 2008. – 584 с.
4. ФЕЛЬДШТЕЙН А.Л., ЯВИЧ Л.Р. *Синтез четырехполюсников и восьмиполусников на СВЧ*. – Москва.:Связь, –1971.
5. SIMON RAMO, JOHN R. WHINNERY, THEODORE VAN DUZER *Fields and waves in communication electronics* // New York-London-Sydney: John Wiley & Sons, Inc., –1965. –754 p.

WIRELESS TRANSMISSION ENERGY GLOBAL SISTEM MODEL.REALISATION PROBLEMS

Yuriy Legovich, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Cand.Sc. Lab. Head (Moscow, Profsoyuznaya st., 65, (495)334-93-61).

Dmitriy Maximov, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, researcher (phoenixjhanjaa@yandex.ru).

Yuriy Maximov, Moscow Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, engineer-researcher (Moscow, Profsoyuznaya st., 65, (495)334-87-21).

Abstract: Global TEM waves resonator formed from idealized conducting Earth and ionosphere surfaces as a possible system for a wireless transmission of energy is described. Frequency characteristic of the system is obtained as well as required value of the system elements quality are defined for a chosen matching network. It is shown, that the system has a very narrow frequency band and requires special measures directed to eliminate its elements losses .It is also required to tune matching networks very accurate and synchronic for both transmission and receiving points, that seems to be impossible to realize without a special control system based on communication channels between these points.

Keywords: wireless transmission, transmission of energy, global resonator, Earth-ionosphere waveguide.