

УДК 621.315

EDN: VNDBSD

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАНСНОГО КОНТУРА В СИСТЕМЕ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ОТ ИНДУКТИВНОСТИ КАТУШКИ

С.А. Чернявская

ORCID: 0009-0002-7404-6856 e-mail: sachernyavskaya@sevsu.ru

Севастопольский государственный университет

Севастополь, Россия

С.В. Гайдук

ORCID: 0009-0003-8092-8529 e-mail: svgaidyk@sevsu.ru

Севастопольский государственный университет

Севастополь, Россия

С.А. Абейдулин

ORCID: 0009-0004-5273-7597 e-mail: saabeidulin@sevsu.ru

Севастопольский государственный университет

Севастополь, Россия

Рассматривается система беспроводной передачи энергии (БПЭ) с последовательной топологией. Данные системы применяются для создания беспроводных зарядных станций электромобилей и других транспортных средств, питающихся от аккумуляторных батарей. Получены зависимости параметров резонансного контура, а именно: активного сопротивления, емкости и величины взаимной индукции от индуктивности катушек. В связи с тем, что ограничивающим фактором при проектировании систем БПЭ являются геометрические размеры катушек резонансного контура, рассмотрена возможность создания прямоугольной катушки, питающей электротележку ET-20132. Рассчитаны ее параметры, проведена аналитическая аппроксимация степенными и трансцендентными функциями. Определены средние ошибки аппроксимации, выбраны оптимальные аналитические зависимости для параметров резонансного контура от величины индуктивности катушки. Результаты исследования могут быть полезны для инженеров, занимающихся разработкой беспроводных зарядных станций.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии, электромобиль, последовательная топология, резонансный контур, аппроксимация, полиномиальная зависимость, трансцендентная функция, ошибка аппроксимации.

Для цитирования: Чернявская С.А., Гайдук С.В., Абейдулин С.А. Определение зависимостей параметров резонансного контура в системе беспроводной передачи энергии от индуктивности катушек. // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 2. С. 40-52. EDN: VNDBSD

DETERMINATION THE DEPENDENCIES OF RESONANCE CIRCUIT PARAMETERS ON COIL INDUCTANCE IN WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM

S.A. Chernyavskaya

ORCID: 0009-0002-7404-6856 e-mail: sachernyavskaya@sevsu.ru
Sevastopol State University
Sevastopol, Russia

S.V. Gaiduk

ORCID: 0009-0003-8092-8529 e-mail: svgaidyk@sevsu.ru
Sevastopol State University
Sevastopol, Russia

S.A. Abeydulin

ORCID: 0009-0004-5273-7597 e-mail: saabeidulin@sevsu.ru
Sevastopol State University
Sevastopol, Russia

Abstract. The work considers a wireless power transmission system with a sequential topology. These systems are used to create wireless charging stations for electric vehicles and other vehicles powered by batteries. The dependences of the parameters of the resonant circuit, namely: active resistance, capacitance and the value of mutual induction on the inductance of the coils, were obtained. Due to the fact that the limiting factor in the design of wireless power transmission systems is the geometric dimensions of the resonant circuit coils, the possibility of creating a rectangular coil that powers the ET-20132 electric cart is considered. Its parameters were calculated and analytical approximation was carried out using polynomial and transcendental functions. The average approximation errors were determined, and the optimal analytical dependences for the parameters of the resonant circuit on the magnitude of the coil inductance were selected. The presented results may be useful for engineers developing wireless charging stations.

Keywords: wireless power transfer, electric vehicle, sequential topology, resonant circuit, approximation, polynomial dependence, transcendental function, approximation error.

For citation: S.A. Chernyavskaya, S.V. Gaiduk and S.A. Abeydulin, "Determination the dependences of resonant circuit parameters on coil inductance in wireless power transmission system", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 40-52, 2024. EDN: VNDBSD

I. Введение

Понятие «беспроводная передача энергии» (БПЭ) является термином собирательного характера, который относится к числу технологий для передачи энергии с помощью электромагнитных полей через воздушный

зазор и обеспечивает питание от источника переменного тока для аккумуляторов или устройств без физических разъемов и проводов. Достоинство технологии содержится в отсутствии физического электрического контакта зарядной станции с устройством, что обеспечивает высокие показатели надежности и безопасности.

Одним из вариантов осуществления БПЭ является метод электромагнитной индукции, основанный на одноименном явлении. Первым научным коллективом, представившим технологию сильно связанного магнитного резонанса, стала исследовательская группа из Массачусетского технологического института в 2007 г. [1].

Для повышения эффективности передачи исследователи всего мира предлагают различные методы: введение промежуточных резонансных катушек [2], оптимизация структуры и параметров катушек [3] и т.д. В [4] исследовано влияние бокового смещения на эффективность передачи и определен диапазон высокой эффективности, но ориентация катушки не учитывалась. В [5] предложена новая передаточная функция, объединено пространственное смещение с параметрами катушек, в результате выведена формула эффективности передачи с помощью метода анализа конечных элементов. Новая аналитическая модель для системы БПЭ с индуктивной связью предложена в [6], где учтены эффекты смещения и геометрии катушки в математических расчетах, но не освещен метод оптимизации. В [7] рассматривается основной принцип резонансно-индукционной передачи энергии, а также произведен обзор беспроводных устройств и методов их зарядки в электромобилях. Работа [8] включала разработку нового типа беспроводного устройства для обеспечения высокоэффективной зарядки аккумулятора электромобилей.

Анализ литературных источников показал, что вопрос определения зависимостей параметров резонансного контура от индуктивности катушек в настоящее время должным образом не исследован. Важную роль в проектировании системы резонансных контуров играет правильное определение параметров и конструктивных элементов, которые участвуют в процессах передачи энергии между элементами.

В данной статье рассматриваются аппроксимации зависимостей параметров резонансного контура от индуктивности катушки различными функциями и определяется ошибка такого приближения.

II. Объект исследования

В процессе проектирования систем электропитания возникают определенные технические ограничения, такие как габариты и размеры приемных и передающих катушек. Также необходимо учитывать диапазон частот,

на которых осуществляется передача электроэнергии. Важно найти оптимальные параметры элементов резонансных контуров, которые обеспечивают минимальное значение максимального тока на конденсаторах.

В качестве исследуемой системы БПЭ, будем рассматривать схему с S-S (последовательной) топологией [9-11], приведенную на рис. 1, так как она обеспечивает лучший коэффициент передачи мощности и имеет минимальную чувствительность резонансной частоты от взаимной индуктивности. Обозначения на рис. 1: u_{in} – напряжение, подводимое к первичному контуру, R_1, R_2 – активные сопротивления первой и второй катушек, R_{load} – активное сопротивление нагрузки, C_1, C_2 – емкости первого и второго контуров, L_1, L_2 – индуктивности первого и второго контуров, L_m – взаимная индуктивность контуров.

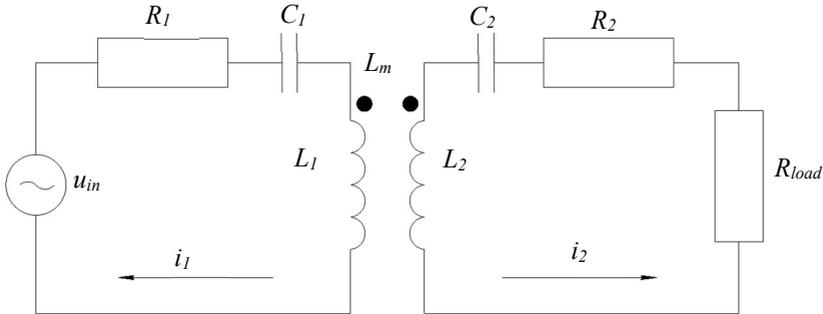


Рис. 1. Схема беспроводной зарядной станции с S-S топологией

Fig. 1. Diagram of a wireless charging station with S-S topology

Высокую эффективность передачи энергии обеспечивает близкое расположение обмоток. Передача энергии осуществляется посредством воздушного трансформатора.

III. Материалы и методы

Основным ограничивающим фактором при проектировании систем БПЭ являются геометрические размеры катушек резонансного контура.

Рассмотрим вариант прямоугольных катушек индуктивности размером $0,6 \times 0,3$ м, расчетное выражение для определения параметра индуктивности, согласно [12], имеет вид:

$$L = \frac{1}{\pi} \mu_0 \cdot \omega^2 \cdot (b+c) \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot b \cdot c}{r} - \frac{c}{b+c} \cdot \ln(c + \sqrt{b^2 + c^2}) \right) - \frac{b}{b+c} \cdot \ln(b + \sqrt{b^2 + c^2}) + \frac{2 \cdot \sqrt{b^2 + c^2}}{b+c} - \frac{1}{2} + 0,447 \cdot \frac{r}{c+b}, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; ω – число витков; b, c – стороны катушки; r – ширина обмотки катушки.

Взаимная индуктивность:

$$L_m = \omega^2 \cdot \frac{\mu_0}{\pi} \cdot c \cdot \left(\ln \left(\frac{c + \sqrt{c^2 + x^2}}{c + \sqrt{c^2 + b^2 + x^2}} \cdot \frac{\sqrt{b^2 + x^2}}{x} \right) + b \cdot \ln \left(\frac{b + \sqrt{b^2 + x^2}}{b + \sqrt{c^2 + b^2 + x^2}} \cdot \frac{\sqrt{c^2 + x^2}}{x} \right) \right) + 2 \cdot \left(\sqrt{c^2 + b^2 + x^2} - \left(\sqrt{c^2 + x^2} - \sqrt{b^2 + x^2} + x \right) \right), \quad (2)$$

где x – расстояние между катушками.

Для вычисления активного сопротивления с учетом зависимости длины провода от числа витков и его диаметра применима формула:

$$R = \rho_m \cdot \frac{\left(2 \cdot (b + c) - \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} \cdot 4 \cdot \frac{\omega - 1}{2} \right) \cdot \omega}{S}, \quad (3)$$

где ρ_m – удельное сопротивление проводника катушки; S – площадь поперечного сечения провода обмотки катушки.

При расчете по (1-3) в зависимости от числа витков принято значение сопротивления нагрузки 2,8 Ом, что соответствует номинальному зарядному току 36 А для аккумуляторных батарей электротележки при напряжении 100 В. Частота, на которой осуществляется передача энергии, принята равной 90 кГц в соответствии с [13]. Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Для определения зависимостей параметров системы БПЭ (рис. 1), составим аналитические выражения взаимной индуктивности контура $L_m(L)$, сопротивления $R(L)$ и емкости $1/C(L)$ от индуктивности L катушек, используя результаты расчетов (1)-(3) и методы аппроксимации. Аппроксимирующая функция [14] должна быть простой, но допускать последующую математическую обработку и достаточно точно отображать полученные характеристики.

Исходя из указанных требований, могут быть использованы методы аппроксимации: полиномиальная (степенная); кусочно-линейная; аппроксимация трансцендентными функциями (экспоненциальными, тригонометрическими и др.).

Таблица 1.
Значения параметров катушки от числа витков

Table 1.
Coil parameter values depending on the number of turns

Кол-во витков	$L_1 = L_2 = L$, Гн	L_m , Гн	$R_1 = R_2 = R$, Ом	$C_1 = C_2 = C$, Ф
1	0,000001843	0,000000307	0,00306	0,0000016900
2	0,000006000	0,000001228	0,00611	0,0000005200
3	0,000011960	0,000002763	0,00916	0,0000002600
4	0,000019430	0,000004912	0,01200	0,0000001400
5	0,000028210	0,000007675	0,01500	0,0000000950
6	0,000038140	0,000010400	0,01800	0,0000000700
7	0,000049090	0,000015030	0,02100	0,0000000500
8	0,000060970	0,000019650	0,02400	0,0000000400
9	0,000073690	0,000024870	0,02800	0,0000000330
10	0,000087170	0,000030700	0,03100	0,0000000280

В связи с необходимостью дальнейшего исследования оптимизации параметров резонансного контура, остановимся на рассмотрении двух методов аппроксимации: полиномиальной и с помощью трансцендентных функций. Чтобы иметь общее суждение о качестве однофакторной модели из относительных отклонений по каждому наблюдению, определим среднюю ошибку аппроксимации, которая показывает среднее отклонение расчетных значений от фактических:

$$\delta = \frac{100\%}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \bar{y}_i}{y_i} \right|, \quad (4)$$

где y_i – эмпирические (фактические) значения функции, в нашем случае это взаимная индуктивность контуров (L_m), активное сопротивление катушки (R), емкость контура ($1/C$); \bar{y}_i – значения функции аппроксимации, вычисленные при подстановке индуктивности (L); $n = 10$ – количество заданных табличных значений. Ошибка аппроксимации в пределах 5...7% свидетельствует о хорошем подборе модели к исходным данным.

Возможно определение средней ошибки аппроксимации (5) как среднее расстояние, на которое значения отклоняются от линии аппроксимации:

$$S = \frac{100\%}{\sum_{i=1}^k \bar{y}_i} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (y - \bar{y}_i)^2}{n}}. \quad (5)$$

Малая ошибка оценки свидетельствует, что все точки данных находятся очень близко к построенной линии.

Аппроксимация полиномиальной функцией имеет вид:

$$f(x) = k_0 + k_1x + k_2x^2 + k_3x^3 + \dots + k_mx^m, \text{ где } m = 1 \dots 5.$$

В качестве трансцендентных функций используются следующие зависимости:

$$y(x) = a \cdot e^{bx} + c; y_1(x) = a \cdot \ln(x + b) + c; y_2(x) = a \cdot x^b + c; y_3(x) = \frac{a}{1 + b \cdot e^{-cx}}.$$

IV. Результаты расчетов

Результаты вычислений сведены в табл. 2, в которых указаны соответствующие им средние ошибки аппроксимации, рассчитанные по (4) и (5). Для упрощения расчетов используется программа *MathCad*, для удобства принято $1/C = C_1$.

Таблица 2.
Степенные и трансцендентные зависимости $L_m(L)$, $R(L)$, $1/C(L)$

Table 2.
Power and transcendental dependences $L_m(L)$, $R(L)$, $1/C(L)$

m	$f(x) = k_0 + k_1x + k_2x^2 + k_3x^3 + \dots + k_mx^m$	S	δ
Степенные зависимости $L_m(L)$			
1	$f_1(x) = -1,628 \cdot 10^{-6} + 0,355x$	7,541	52,535
2	$f_2(x) = -2,744 \cdot 10^{-7} + 0,243x + 1,315 \cdot 10^3 x^2$	1,741	5,4
3	$f_3(x) = -5,7 \cdot 10^{-8} + 0,207x + 2,38 \cdot 10^3 x^2 - 8,071 \cdot 10^6 x^3$	1,417	2,263
4	$f_4(x) = -5,7 \cdot 10^{-8} + 0,207x + 2,38 \cdot 10^6 x^2 - 8,071 \cdot 10^3 x^3 - 1,221 \cdot 10^3 x^4$	1,417	2,263
5	$f_5(x) = -5,7 \cdot 10^{-8} + 0,207x + 2,38 \cdot 10^6 x^2 - 8,071 \cdot 10^3 x^3 - 1,221 \cdot 10^3 x^4 - 0,136 x^5$	1,417	2,263
Степенные зависимости $R(L)$			
1	$f_1(x) = 9,105 \cdot 10^{-3} + 1,826x$	19,576	35,461
2	$f_2(x) = 6,902 \cdot 10^{-3} + 3,654x - 142,61 x^2$	10,679	20,524
3	$f_3(x) = 5,789 \cdot 10^{-3} + 5,672x - 565,97 x^2 + 2,079 \cdot 10^4 x^3$	7,207	13,608
4	$f_4(x) = 4,876 \cdot 10^{-3} + 8,677x - 1,805 \cdot 10^3 x^2 + 1,747 \cdot 10^5 x^3 - 5,749 \cdot 10^6 x^4$	5,454	10,402
5	$f_5(x) = 4,363 \cdot 10^{-3} + 11,43x - 3,746 \cdot 10^3 x^2 + 6,272 \cdot 10^5 x^3 - 4,726 \cdot 10^7 x^4 + 1,293 \cdot 10^9 x^5$	4,22	8,4

Продолжение табл. 2

Table 2 (continued)

m	$f(x) = k_0 + k_1x + k_2x^2 + k_3x^3 + \dots + k_mx^m$	S	δ	
Степенные зависимости $1/C(L)$				
1	$f_1(x) = 2,718 \cdot 10^6 + 2,562 \cdot 10^{11}x$	50,43	86,641	
2	$f_2(x) = -4,085 \cdot 10^6 + 8,223 \cdot 10^{11}x - 6,606 \cdot 10^{15}x^2$	36,25	83,953	
3	$f_3(x) = 2,814 \cdot 10^6 - 3,174 \cdot 10^{11}x + 2,722 \cdot 10^{16}x^2 - 2,561 \cdot 10^{20}x^3$	19,54	44,163	
4	$f_4(x) = 2,814 \cdot 10^6 - 3,174 \cdot 10^{11}x + 2,722 \cdot 10^{16}x^2 - 2,561 \cdot 10^{20}x^3 - 3,877 \cdot 10^{16}x^4$	19,54	44,163	
5	$f_5(x) = 2,814 \cdot 10^6 - 3,174 \cdot 10^{11}x + 2,722 \cdot 10^{16}x^2 - 2,561 \cdot 10^{20}x^3 - 3,877 \cdot 10^{16}x^4 - 4,329 \cdot 10^{12}x^5$	19,54	44,163	
m	Общий вид	Аппроксимируемая функция	S	δ
Трансцендентные зависимости $L_m(L)$				
1	$y(x) = a \cdot e^{bx} + c$	$y(x) = -0,063 \cdot e^{-5,652x} + 0,063$	2,39	9,54
2	$y_1(x) = a \cdot \ln(x+b) + c$	$y_1(x) = 0,282 \cdot \ln(x + 0,794) + 0,065$	2,39	9,536
3	$y_2(x) = a \cdot x^b + c$	$y_2(x) = -2,973 \cdot x^{-2,458 \cdot 10^{-6}} + 2,973$	13,9	51,499
4	$y_3(x) = \frac{a}{1+b \cdot e^{-cx}}$	$y_3(x) = \frac{3,585 \cdot 10^{-5}}{1+9,595 \cdot e^{-5,298 \cdot 10^3 x}}$	2,25	11,949
Трансцендентные зависимости $R(L)$				
1	$y(x) = a \cdot e^{bx} + c$	$y(x) = -0,047 \cdot e^{-1,004 \cdot 10^4 x} + 0,05$	0,977	$6,695 \cdot 10^3$
2	$y_1(x) = a \cdot \ln(x+b) + c$	$y_1(x) = -0,034 \cdot \ln(x + 1,223 \cdot 10^3) + 0,255$	16,75	$1,068 \cdot 10^5$
3	$y_2(x) = a \cdot x^b + c$	$y_2(x) = -1,778 \cdot 10^3 \cdot x^{-4,029 \cdot 10^{-6}} + 1,778 \cdot 10^3$	5,64	$3,313 \cdot 10^4$
4	$y_3(x) = \frac{a}{1+b \cdot e^{-cx}}$	$y_3(x) = \frac{0,032}{1+5,144 \cdot e^{4,784 \cdot 10^4 x}}$	2,28	$1,747 \cdot 10^4$
Трансцендентные зависимости $1/C(L)$				
1	$y(x) = a \cdot e^{bx} + c$	$y(x) = 7,409 \cdot 10^{12} \cdot e^{0,035x} - 7,409 \cdot 10^{12}$	15,95	$2,553 \cdot 10^{13}$
2	$y_1(x) = a \cdot \ln(x+b) + c$	$y_1(x) = 2,496 \cdot 10^{11} \cdot \ln(x+0,974) + 6,473 \cdot 10^9$	15,95	$2,553 \cdot 10^{13}$
3	$y_2(x) = a \cdot x^b + c$	$y_2(x) = -1,2 \cdot 10^{12} \cdot x^{-5,317 \cdot 10^{-6}} + 1,2 \cdot 10^{12}$	15,07	$3,849 \cdot 10^{13}$
4	$y_3(x) = \frac{a}{1+b \cdot e^{-cx}}$	$y_3(x) = \frac{3,482}{1-e^{-2,664 \cdot 10^{-3} x}}$	19,99	$7,095 \cdot 10^{13}$

Полученные зависимости представлены на графиках (рис. 2, а-е).

В связи с тем, что осуществляется аппроксимация функциями, графики приведены для аргументов, находящихся в промежутке, соответствующем индуктивностям в табл. 1. В силу того, что задача решается в ограничениях, связанных с геометрическими размерами оборудования, точки, выходящие за интересующий промежуток, не рассматриваются.

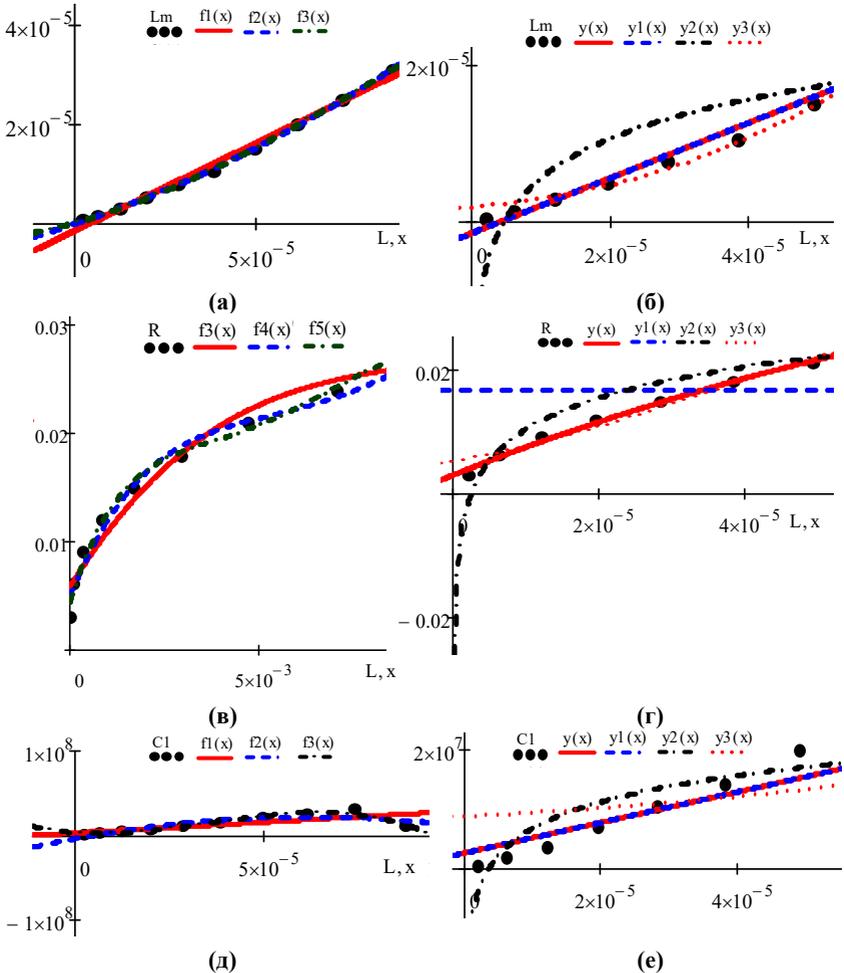


Рис. 2. Графики аппроксимаций:
 степенной (а) и трансцендентной (б) зависимости $L_m(L)$;
 степенной (в) и трансцендентной (г) зависимости $R(L)$;
 степенной (д) и трансцендентной (е) зависимости $1/C(L)$

Fig. 2. Fitting functions:
 polynomial (a) and transcendental (b) of dependence $L_m(L)$;
 polynomial (в) and transcendental (г) of dependence $R(L)$;
 polynomial (д) and transcendental (е) of dependence $1/C(L)$

В. Обсуждение результатов

Начиная с третьей степени многочлена, аппроксимирующего функцию $L_m(L)$, погрешность уменьшается достаточно медленно и коэффициенты в полиноме при соответствующих степенях совпадают. Следовательно, более точный вариант аппроксимации – полином третьей степени:

$$L_m(L) = -5,7 \cdot 10^{-8} + 0,207L + 2,38 \cdot 10^3 L^2 - 8,071 \cdot 10^6 L^3.$$

Наилучшей аппроксимирующей функцией для $R(L)$ будет показательная вида:

$$R(L) = -0,047 \cdot e^{-1,00410^4 L} + 0,05.$$

Оптимальной аппроксимирующей функцией $1/C$:

$$\frac{1}{C}(L) = -1,2 \cdot 10^{12} \cdot L^{-5,31710^{-6}} + 1,2 \cdot 10^{12}.$$

VI. Заключение

В результате для экспериментальной установки системы БПЭ с последовательной топологией, разработанной для электротележки ET-20132, оборудованной беспроводной зарядной станцией, получены зависимости параметров резонансного контура от индуктивности катушки. Это необходимо для дальнейшего оптимизационного исследования и определения эффективности передачи системы БПЭ. Итоги работы могут быть полезны для инженеров, занимающихся разработкой систем беспроводной передачи энергии.

© Чернявская С.А., 2024

© Гайдук С.В., 2024

© Абейдулин С.А., 2024

Поступила в редакцию 02.04.2024

Принята к публикации 20.04.2024

Received 02.04.2024

Accepted 20.04.2024

Библиографический список

- [1] Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J.D., Fisher P.; Soljacic M. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances // Science. 2007. Vol. 317. No. 5834. С. 83-86. DOI: 10.1126/science.1143254
- [2] Kim J., Son H.-C., Kim K.-H., Park Y.-J. Correction to “Efficiency analysis of magnetic resonance wireless power transfer with intermediate resonant coil” // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2011. Vol. 10. С. 1609-1609. DOI: 10.1109/LAWP.2011.2178876

- [3] Jonah O., Georgakopoulos S.V. Wireless power transfer in concrete via strongly coupled magnetic resonance // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2013. № 61 (3). С. 1378-1384. DOI: 10.1109/TAP.2012.2227924
- [4] Gao P., Tian Z., Pan T., Wu J., Gui W. Transmission efficiency analysis and optimization of magnetically coupled resonant wireless power transfer system with misalignments // *AIP Advances*. 2018. Vol. 8 (8). Art. no. 085016. DOI: 10.1063/1.5044231
- [5] Wang J., Ho S.L., Fu W.N. Sun M. Analytical design study of a novel witricity charger with lateral and angular misalignments for efficient wireless energy transmission // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2011. № 47 (10). С. 2616-2619. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2151253
- [6] Fotopoulou K., Flynn B.W. Wireless power transfer in loosely coupled links: coil misalignment model // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2011. № 47 (2). С. 416-430. DOI: 10.1109/TMAG.2010.2093534
- [7] Niu S., Xu H., Sun Z., Shao Z.Y., Jian L. The state-of-the-arts of wireless electric vehicle charging via magnetic resonance: principles, standards and core technologies // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. № 114 (8). Art. no. 109302. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109302
- [8] Mohamed N., Aymen F., Alqarni M., Turkey R.A., Alamri B., Ali Z.M., Abdel Aleem S.H.E. A new wireless charging system for electric vehicles using two receiver coils // *Ain Shams Engineering Journal*. 2022. № 13 (2). Art. no. 101569. DOI: 10.1016/j.asej.2021.08.012
- [9] Zhang W., Mi C.C. Compensation topologies of high-power wireless power transfer systems // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2016. № 65 (6). С. 4768-4778. DOI: 10.1109/TVT.2015.2454292
- [10] Jayalath S., Khan A. Design, challenges, and trends of inductive power transfer couplers for electric vehicles: A review // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2021. № 9 (5). С. 6196-6218. DOI: 10.1109/JESTPE.2020.3042625
- [11] Zavylov V.M., Abeidulin S.A., Dubkov E.A., Veliliaev A.S., Semykina I.Y. Criteria for choosing of resonant circuit parameters of wireless power transfer charging system // *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*. 2022. № 18 (1). Art. no. 2236. DOI: 10.22068/IJEEE.18.1.2236
- [12] Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
- [13] SAE J2954_201904. Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in / Electric Vehicles and Alignment Methodology. 2019-04-23. SAE International: Warrendale, PA, USA.
- [14] Данилов А.М., Гарькина И.А. Интерполяция, аппроксимация, оптимизация: анализ и синтез сложных систем. Пенза: ПГУАС, 2014. – 168 с.

References

- [1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P. Fisher and M. Soljacic, “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances”, *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, July 2007. DOI: 10.1126/science.1143254

- [2] J. Kim, H.-C. Son, K.-H. Kim and Y.-J. Park, "Correction to "Efficiency analysis of magnetic resonance wireless power transfer with intermediate resonant coil", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 1609-1609, Dec. 2011. DOI: 10.1109/LAWP.2011.2178876
- [3] O. Jonah and S.V. Georgakopoulos, "Wireless power transfer in concrete via strongly coupled magnetic resonance", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 3, pp. 1378-1384, Mar. 2013. DOI: 10.1109/TAP.2012.2227924
- [4] P. Gao, Z. Tian, T. Pan, J. Wu and W. Gui, "Transmission efficiency analysis and optimization of magnetically coupled resonant wireless power transfer system with misalignments", *AIP Advances*, vol. 8 (8), art. no. 085016, Aug. 2018. DOI: 10.1063/1.5044231
- [5] J. Wang, S.L. Ho, W.N. Fu and M. Sun, "Analytical design study of a novel witrlicity charger with lateral and angular misalignments for efficient wireless energy transmission", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 10, pp. 2616-2619, Oct. 2011. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2151253
- [6] K. Fotopoulou and B.W. Flynn, "Wireless power transfer in loosely coupled links: coil misalignment model", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 2, pp. 416-430, Feb. 2011. DOI:10.1109/TMAG.2010.2093534
- [7] S. Niu, H. Xu, Z. Sun, Z.Y. Shao and L. Jian, "The state-of-the-arts of wireless electric vehicle charging via magnetic resonance: principles, standards and core technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 114, no. 8, art. no. 109302, Oct. 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109302
- [8] N. Mohamed, F. Aymen, M. Alqarni, R.A. Turkey, B. Alamri, Z.M. Ali and S.H.E. Abdel Aleem, "A new wireless charging system for electric vehicles using two receiver coils", *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 13, no. 2, art. no. 101569, Mar. 2022. DOI: 10.1016/j.asej.2021.08.012
- [9] W. Zhang and C.C. Mi, "Compensation topologies of high-power wireless power transfer systems", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 4768-4778, June 2016. DOI: 10.1109/TVT.2015.2454292
- [10] S. Jayalath and A. Khan, "Design, challenges, and trends of inductive power transfer couplers for electric vehicles: A review", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 5, pp. 6196-6218, Oct. 2021. DOI: 10.1109/JESTPE.2020.3042625
- [11] V.M. Zavylov, S.A. Abeidulin, E.A. Dubkov, A.S. Veliliaev and I.Y. Semykina, "Criteria for choosing of resonant circuit parameters of wireless power transfer charging system", *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, vol. 18, no. 1, art. no. 2236, 2022. DOI: 10.22068/IJEEE.18.1.2236
- [12] P.L. Kalantarov and L.A. Tseytlin, *Raschet induktivnostej: Spravochnaya kniga [Calculation of inductances: Reference book]*. Leningrad: Ergoatomizdat, 1986 (in Russian).
- [13] *Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in / Electric Vehicles and Alignment Methodology*, SAE J2954_201904, April 2019.
- [14] A.M. Danilov and I.A. Garkina, *Interpolyaciya, approksimaciya, optimizaciya: analiz i sintez slozhnyh system [Interpolation, approximation, optimization: analysis and synthesis of complex systems]*. Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2014 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Чернявская Светлана Алексеевна, кандидат физико-математических наук, доцент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация. **Svetlana A. Chernyavskaya**, Cand. Sci. (Phys. & Math.), associate professor of the Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Гайдук Светлана Владимировна, старший преподаватель Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация. **Svetlana V. Gaiduk**, senior lecturer of the Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Абейдулин Сергей Адельзанович, старший преподаватель Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация. **Sergey A. Abeidulin**, senior lecturer of the Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.