

NOTE:

In formulas: $P=\pi$

Поиск оптимального конструктива катушки Теслы

1. Попробуем здесь выяснить, как нужно мотать катушку, чтобы совпали её LC- и $\frac{1}{4}$ -волновой резонансы.
Занесём в Таблицу 1 параметры катушек, которые были намотаны и испытаны.

The search for the optimum design of the Tesla coil

1. We are going to try and find out, how to wind the coil, so that its LC- and $\frac{1}{4}$ wave resonances match. We will enter into Table 1 the parameters of the coils, which we have already wound and tested.

Таблица 1 Результаты измерений и расчётов параметров катушек.

№ п /п	Длина намотки, м	Количе ство витков	Индуктив ность, мГн	Собствен. ёмкость, пФ	Частота, МГц		Примечание
					LC-резо- нанса	$\frac{1}{4}$ -волнового резонанса	
1	2	3	4		4	5	6
Диаметр каркаса D =0,05 м, диаметр провода d = 0,00040 м							
1	0,0820	205	1,024	2,73	3,010	1,965	-
2	0,1248	312	1,690	3,26	2,145	1,198	-
3							
Диаметр каркаса D =0,05 м, диаметр провода d = 0,00063 м							
4	0,1265	204	0,700	3,49	3,218	1,964	-
5	0,065	107	0,330	3,9	4,430	3,74	-
6							

Table 1 Results of measurements and calculations of the parameters of the coils.

(Note, in Russia commas and full stops in numbers are the other way around i.e 1,2 is actually 1.2 – I have changed this for all the numbers in this document, but you may want to bear this in mind in case I missed any)

№	Length of winding, m	Numbe r of coils	Inductance , mH	Own capacitanc e pF	Frequency, MHz		Notes
					LC-resonance	$\frac{1}{4}$ -wave resonance	
1	2	3	4		4	5	6

D =0.05 м, d = 0.00040 м							
1	0.0820	205	1.024	2.73	3.010	1.965	-
2	0.1248	312	1.690	3.26	2.145	1.198	-
3							
D =0.05 м, d = 0.00063 м							
4	0.1265	204	0.700	3.49	3.218	1.964	-
5	0.065	107	0.330	3.9	4.430	3.74	-
6							

1.1. В литературе приводится достаточно точная формула для расчёта индуктивности цилиндрической катушки (для намотки без принудительного шага, то есть, виток к витку), у которой длина намотки больше диаметра каркаса:

$$L = 0,01 * D_{кат} * W^2 / (h / D_{кат} + 0,44), \quad (1)$$

где L – индуктивность, мкГн, D_{кат} – диаметр катушки, см, (как оказалось, всё же между центрами витков) h – длина намотки, см, W – количество витков.

Собственная емкость катушки приближенно рассчитывается по формуле:

$$C_0 = (0,5 \div 1,0) D,$$

1.1 In the literature there is an accurate enough formula for the calculation of the inductance a cylindrical coil (for the winding without the forced coil pitch, in other words, turn to turn), which has the length of the winding greater than the diameter of the frame:

$$L = 0.01 * D_{coil} * W^2 / (h / D_{coil} + 0.44), \quad (1)$$

where L - is the inductance, uH, D_{coil} – is the diameter of the coil, cm, (as it turned out, still between the centres of the turns) h – is the length of the winding, cm, W – is the number of turns.

The own capacitance of the coil is approximately calculated by the formula:

$$C_0 = (0.5 \div 1,0) D,$$

где C₀- Собственная емкость катушки, пФ, D - диаметр катушки, см.

Сравнение с результатами, рассчитанными для наших катушек, показывает, что формула в общем, правильная, но диапазон точности в два раза - не хорошо.

В литературе для однослойной незкранированной катушки приводится более точная формула:

$$C_0 = \pi * D / [8,3 * \ln(\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 1})] * \epsilon \epsilon_0, \quad (2)$$

где C₀ - Собственная емкость катушки, пФ, D - диаметр катушки, см, $\alpha = \tau / d_0$, τ - расстояние между центрами соседних витков (шаг намотки), d₀ - диаметр провода без изоляции, $\epsilon \epsilon_0 \approx 1,2$ – эквивалентная диэлектрическая проницаемость изоляции провода. Скажу сразу, что его я вычислил из сравнения расчётов и данных эксперимента.

Из формулы следует, что при сплошной намотке собственная

ёмкость катушки зависит только от диаметра каркаса и применяемого провода.

Толщина изоляции для провода 0,35 мм равна 0,050 мм, и для него $\alpha_1 = \tau_1/d_01 = (0,35 + 2*0,050) / 0,35 = 1,29$,

а для провода 0,56 - 0,063 мм, для него $\alpha_2 = \tau_2/d_02 = (0,56 + 2*0,063) / 0,56 = 1,22$.

Проверим, насколько совпадают расчёты по этой формуле с реально измеренными для наших катушек.

Where C_0 – is the coil capacitance, pF, D – is the diameter of the coil, cm.

A comparison with the results, calculated for our coils, shows that the formula is, generally, correct, but the accuracy range which is double – is not good.

In the literature is given a more precise formula for the single layer unshielded coil:

$$C_0 = \pi * D / [8.3 * \ln(\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 1})] * \epsilon \epsilon_0, (2)$$

Where C_0 – is the coil capacitance, pF, D – is the diameter of the coil, cm, $\alpha = \tau/d_0$,

τ – is the distance between the centres of the adjacent turns (coil pitch),

d_0 – is the diameter of the wire without insulation, $\epsilon \epsilon_0 \approx 1.2$ – is the equivalent dielectric constant of the insulation of the wire. I will say straight away, that this I worked out by comparing the calculations and the data from the experiment.

From the formula it follows, that when pull-through winding is used the coil capacitance is dependent only on the diameter of the frame and the wire used.

The thickness of the insulation for the wire 0.35 mm is 0.050 mm, and for it $\alpha_1 = \tau_1/d_01 = (0.35 + 2*0.050) / 0.35 = 1.29$, and for the wire 0.56 – 0.063 mm, for it $\alpha_2 = \tau_2/d_02 = (0.56 + 2*0.063) / 0.56 = 1.22$.

Let's check, to what extent the calculations from this formula match with actual measurements for our coils.

Таблица 2 Сравнение измерений и расчётов параметров катушек.

№ п /п	Длина намотки, м	Количе-	Индуктивность,		Собственная ёмкость,		Примечание
		ство	мГн		пФ		
		витков	измерено	Расчёт	измерено	Расчёт	
1	2	3	4		4	5	6
Диаметр каркаса D =0,05 м, диаметр провода d = 0,00040 м							
1	0,0820	205	1,024	1,030	2,73	3,04	δL = 0,6%; δC = 11,3%
2	0,1248	312	1,690	1,656	3,26	3,04	δL = 2,0%; δC = 6,7%
Диаметр каркаса D =0,05 м, диаметр провода d = 0,00062 м							
3	0,1265	204	0,700	0,715	3,49	3,48	δL = 2,1%; δC = 0,3%
Диаметр каркаса D =0,032 м,							
4	Диаметр провода d = 0,00040 м					1,95	
5	Диаметр провода d = 0,00062 м					2,23	
Диаметр каркаса D =0,11 м,							
6	Диаметр провода d = 0,00040 м					6,69	
7	Диаметр провода d = 0,00062 м					7,66	

Table 2 Comparison of measurements with calculations of the parameters of the coils.

№	Length of winding, m	Number of coils	Inductance, mH		Own capacitance, pF		Notes
			Measured	Calculate d	Measured	Calculated	
1	2	3	4		4	5	6
D =0.05 м, d = 0.00040 м							
1	0.0820	205	1.024	1.030	2.73	3.04	$\delta L = 0.6\%$; $\delta C = 11.3\%$
2	0.1248	312	1.690	1.656	3.26	3.04	$\delta L = 2.0\%$; $\delta C = 6.7\%$
D =0.05 м, d = 0.00062 м							
3	0.1265	204	0.700	0.715	3.49	3.48	$\delta L = 2.1\%$; $\delta C = 0.3\%$
D =0.032 м,							
4	d = 0.00040 м					1.95	
5	d = 0.00062 м					2.23	
D =0.11 м,							
6	d = 0.00040 м					6.69	
7	d = 0.00062 м					7.66	

1.2. Построим график зависимости индуктивности L от длины намотки h . Для этого в формуле (1) выразим количество витков через диаметр провода с изоляцией d и длину намотки h , (здесь D – диаметр каркаса):

$$W = h/d$$

$$L = 0,01 \cdot (D+d) \cdot (h/d)^2 / [h/(D+d) + 0,44] \quad (3)$$

Графики зависимости индуктивности катушки от длины намотки для трубы диаметром 5 см приведены на рисунке 1.

1.2 Let's plot the inductance L and the length of the winding h on a graph. For this in formula (1) we will express the number of turns through the diameter of the wire with isolation d and the length of the winding, h (here D – is the diameter of the frame):

$$W = h/d$$

$$L = 0.01 \cdot (D+d) \cdot (h/d)^2 / [h/(D+d) + 0.44] \quad (3)$$

The graph of the inductance of the coil and the length of the winding for a pipe with a 5 cm diameter are shown in figure 1.

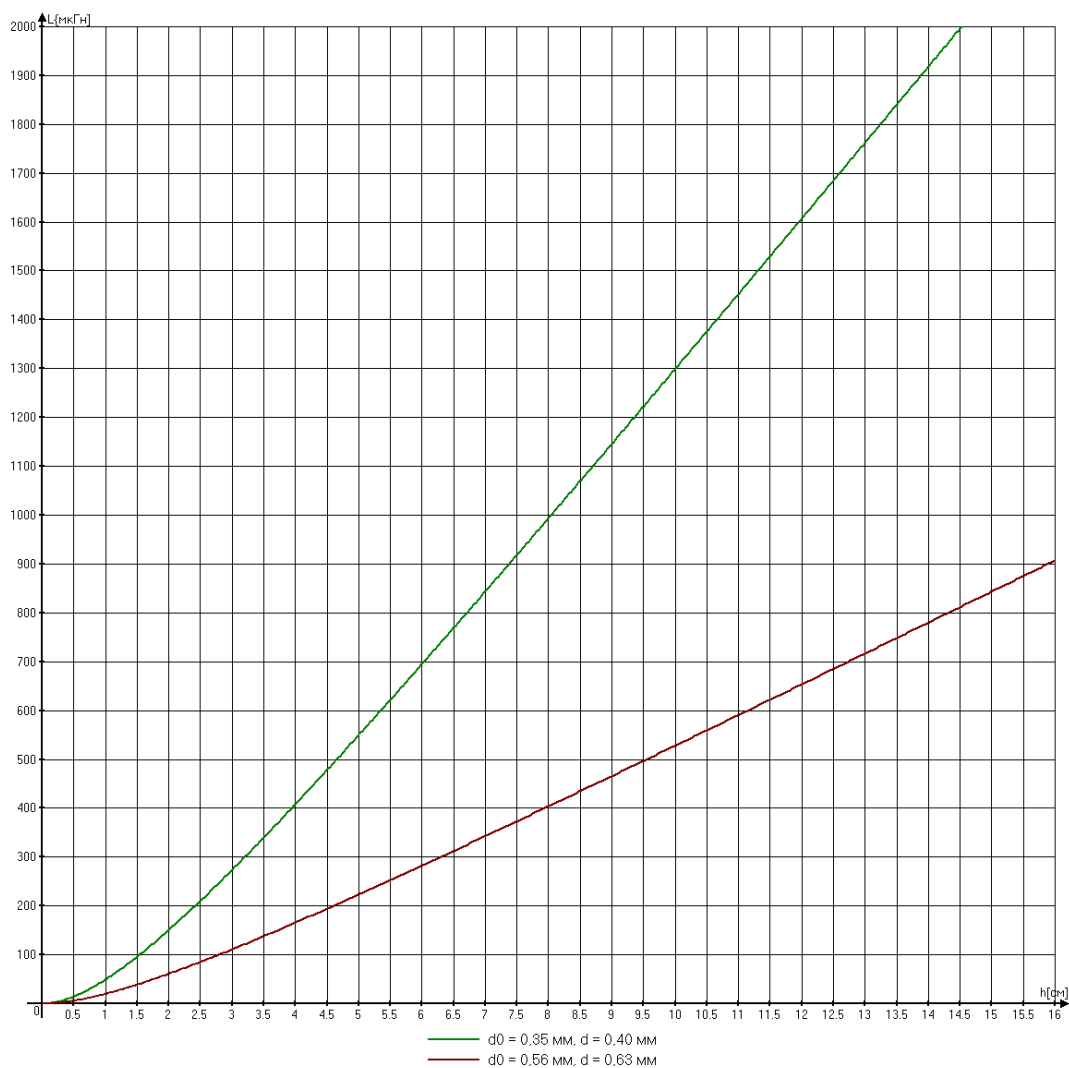


Рис. 1. Графики зависимости индуктивности от длины намотки.

Собственно, графики просто показывают, что зависимость индуктивности однослойных катушек, при длине намотки больше диаметра каркаса, практически линейная. Это вроде как для справки, иногда полезно знать.

Fig. 1. The graph of the inductance and length of winding.

Strickly speaking, the graph just shows, that the correlation of the inductance of single-layer coils, with the length of the winding which is greater than the diameter of the frame, is practically linear. This is kind of for reference purposes, sometimes it's useful to know this.

Graph legend:

$d_0 = 0.35 \text{ mm}$, $d = 0.40 \text{ mm}$
 $d_0 = 0.56 \text{ mm}$, $d = 0.63 \text{ mm}$

1.3. Нам больше интересует поиск длины намотки, при которой совпадают LC- и ¼-волновой резонансы, если такое в принципе возможно. Для этого построим совмещённые графики зависимости длины волны с частотой LC-резонанса от длины намотки и длины волны ¼-волнового резонанса в проводе катушки.

Частота LC-резонанса определяется по формуле:

$f_{LC} = 1 / 2\pi\sqrt{L \cdot C}$, длина волны, соответственно, будет равна:

$\lambda_{LC} = c / f_{LC} = c \cdot 2\pi\sqrt{L \cdot C}$, где $c = 299792458$ м/с - скорость света,

L представим в виде выражения (3), с учётом того, что это выражение даёт результат в мкГн, а нам нужно в Гн:

$$\begin{aligned}\lambda_{LC} &= c / f_{LC} = c \cdot 2\pi\sqrt{L \cdot C} = c \cdot 2\pi\sqrt{[0,01 \cdot (D+d) \cdot (h/d)^2 / (h/(D+d)+0,44)] \cdot C} = \\ &= 299792458 \cdot 2\pi\sqrt{[10^{-6} \cdot 0,01 \cdot (D+d) \cdot (h/d)^2 \cdot C / (h/(D+d)+0,44)]} = \\ &= 299792458 \cdot 2\pi \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \cdot (h/d) \cdot \sqrt{[(D+d) \cdot C / (h/(D+d)+0,44)]} \quad (4)\end{aligned}$$

а ёмкость – согласно расчёту по формуле (2)

1.3 We are more interested in discovering the length of the winding, at which the LC- and ¼-wave resonances match, if this is in principle possible. For this we will plot the combined graphs of the LC-resonance frequency wavelength with the length of the winding and the ¼-wave resonance wavelength in the wire of the coil.

The LC-resonance frequency is worked out using the formula:

$f_{LC} = 1 / 2\pi\sqrt{L \cdot C}$, the wavelength, respectively, will equal:

$\lambda_{LC} = c / f_{LC} = c \cdot 2\pi\sqrt{L \cdot C}$, where $c = 299792458$ m/sec – the speed of light, we will express L as per (3), bearing in mind, that this expression gives us a result in uH, and we want it in henries:

$$\begin{aligned}\lambda_{LC} &= c / f_{LC} = c \cdot 2\pi\sqrt{L \cdot C} = c \cdot 2\pi\sqrt{[0,01 \cdot (D+d) \cdot (h/d)^2 / (h/(D+d)+0,44)] \cdot C} = \\ &= 299792458 \cdot 2\pi\sqrt{[10^{-6} \cdot 0,01 \cdot (D+d) \cdot (h/d)^2 \cdot C / (h/(D+d)+0,44)]} = \\ &= 299792458 \cdot 2\pi \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \cdot (h/d) \cdot \sqrt{[(D+d) \cdot C / (h/(D+d)+0,44)]} \quad (4)\end{aligned}$$

And the capacitance – according to the formula calculations (2)

1.3.1. Подставив в выражение (4) численные значение диаметра каркаса, 5 см, внешний диаметр провода (в см) и соответствующую ему ёмкость, получим формулы для построения графиков зависимости длины волны с частотой LC- резонанса от длины намотки:

- для провода $d_{01} = 0,35$ мм:

$$\begin{aligned}\lambda_{LC1} &= 299792458 \cdot 2\pi \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \cdot (h/0,04) \cdot \sqrt{[5,04 \cdot 3,04 \cdot 10^{-12} / (h/5,04+0,44)]} = \\ &= 299792458 \cdot 2\pi \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \cdot 25 \cdot h \cdot 3,9 \cdot 10^{-6} / \sqrt{(h/5,04+0,44)} = \\ &= 0,299792458 \cdot 2\pi \cdot 2,5 \cdot h \cdot 3,9 / \sqrt{(h/5,04+0,44)} = 18,37 \cdot h / \sqrt{(h/5,04+0,44)} \quad (5)\end{aligned}$$

- для провода $d_{02} = 0,56$ мм:

$$\begin{aligned}\lambda_{LC2} &= 299792458 \cdot 2\pi \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \cdot (h/0,063) \cdot \sqrt{[5,063 \cdot 3,48 \cdot 10^{-12} / (h/5,063+0,44)]} = \\ &= 299792458 \cdot 2\pi \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \cdot 16,13 \cdot h \cdot 4,17 \cdot 10^{-6} / \sqrt{(h/5,063+0,44)} = \\ &= 0,299792458 \cdot 2\pi \cdot 1,613 \cdot h \cdot 4,17 / \sqrt{(h/5,063+0,44)} = 12,67 \cdot h / \sqrt{(h/5,063+0,44)} \quad (6)\end{aligned}$$

Для построения графиков зависимости длины волны ¼-волнового резонанса в проводе катушки от длины намотки, выразим длину провода через длину намотки (при

коэффициенте замедления равном 1), с учётом того, что величину h необходимо представлять в см:

- для провода $d_{01} = 0,35$ мм:

$$\lambda_{ЧВ1} = 4 \cdot \pi \cdot (D + d_1) \cdot 0,01 \cdot h / d_1 = 4 \cdot \pi \cdot 0,0504 \cdot 0,01 \cdot h / 0,0004 = 15,83 \cdot h; \quad (7)$$

- для провода $d_{02} = 0,56$ мм:

$$\lambda_{ЧВ2} = 4 \cdot \pi \cdot (D + d_2) \cdot 0,01 \cdot h / d_2 = 4 \cdot \pi \cdot 0,05063 \cdot 0,01 \cdot h / 0,00063 = 10,1 \cdot h. \quad (8)$$

Вид формул для программы AGrapher: $18.37 \cdot x / \sqrt{x/5 + 0.44}$

$15.83 \cdot x$ $15.83 \cdot x / 0.8$

$12.67 \cdot x / \sqrt{x/5 + 0.44}$ $10.1 \cdot x$ $10.1 \cdot x / 0.8$

Графики зависимости длины волны с частотой LC-резонанса от длины намотки и длины волны $1/4$ -волнового резонанса в проводе катушки, намотанной на круглой трубе диаметром 50 мм, представлены на рисунке 2.

1.3.1 If we substitute into expression (4) the numerical values of the diameter of the frame, 5 cm, the external diameter of the wire (in cm) and its capacitance, we will get the formulas for plotting the graphs of the LC- resonance frequency wavelength and the length of the winding:

- for wire $d_{01} = 0.35$ mm:

$$\begin{aligned} \lambda_{LC1} &= 299792458 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10^{-3} \cdot 0.1 \cdot (h/0.04) \cdot \sqrt{[5.04 \cdot 3.04 \cdot 10^{-12} / (h/5.04 + 0.44)]} = \\ &= 299792458 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10^{-3} \cdot 0.1 \cdot 25 \cdot h \cdot 3.9 \cdot 10^{-6} / \sqrt{(h/5.04 + 0.44)} = \\ &= 0.299792458 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 2.5 \cdot h \cdot 3.9 / \sqrt{(h/5.04 + 0.44)} = 18.37 \cdot h / \sqrt{(h/5.04 + 0.44)} \end{aligned} \quad (5)$$

- for wire $d_{02} = 0.56$ mm:

$$\begin{aligned} \lambda_{LC2} &= 299792458 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10^{-3} \cdot 0.1 \cdot (h/0.063) \cdot \sqrt{[5.063 \cdot 3.48 \cdot 10^{-12} / (h/5.063 + 0.44)]} = \\ &= 299792458 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10^{-3} \cdot 0.1 \cdot 16.13 \cdot h \cdot 4.17 \cdot 10^{-6} / \sqrt{(h/5.063 + 0.44)} = \\ &= 0.299792458 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 1.613 \cdot h \cdot 4.17 / \sqrt{(h/5.063 + 0.44)} = 12.67 \cdot h / \sqrt{(h/5.063 + 0.44)} \end{aligned} \quad (6)$$

For charting the $1/4$ -wave resonance wavelength in the wire of the coil and the winding length, we will express the length of the wire through the length of the winding (with a deceleration rate equal to 1), bearing in mind that it is necessary to represent the value of h in cm:

- for wire $d_{01} = 0.35$ mm:

$$\lambda_{WF1} = 4 \cdot \pi \cdot (D + d_1) \cdot 0.01 \cdot h / d_1 = 4 \cdot \pi \cdot 0.0504 \cdot 0.01 \cdot h / 0.0004 = 15.83 \cdot h; \quad (7)$$

- for wire $d_{02} = 0.56$ mm:

$$\lambda_{WF2} = 4 \cdot \pi \cdot (D + d_2) \cdot 0.01 \cdot h / d_2 = 4 \cdot \pi \cdot 0.05063 \cdot 0.01 \cdot h / 0.00063 = 10.1 \cdot h. \quad (8)$$

(Note: I am guessing that the letters in the above formula stood for wave frequency, hence WF – this goes for all the following formulas too, where you see the notation WF)

This is what the formulas look like for the programme AGrapher:

$18.37 \cdot x / \sqrt{x/5 + 0.44}$ $15.83 \cdot x$ $15.83 \cdot x / 0.8$

$12.67 \cdot x / \sqrt{x/5 + 0.44}$ $10.1 \cdot x$ $10.1 \cdot x / 0.8$

The charts of the LC-resonance frequency wavelength from the winding length and the $1/4$ -wave resonance wavelength in the wire of the coil, wound on a round 50 mm diameter pipe, are shown in Figure 2.

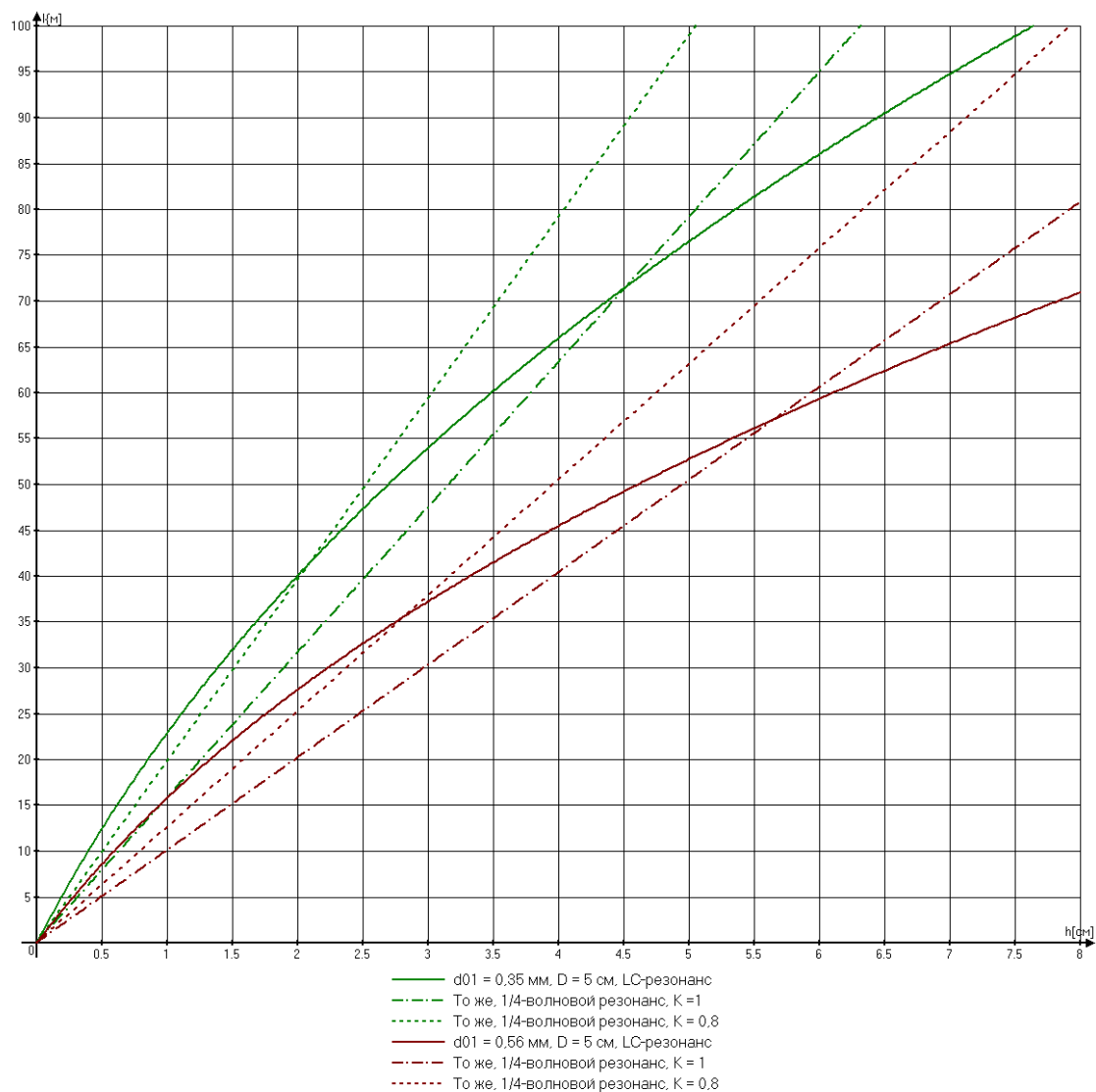


Рис. 2. Графики зависимости длины волны с частотой LC-резонанса и $1/4$ -волнового резонанса от длины намотки для трубы 50 мм.

Figure 2. The graph of the LC-resonance frequency wavelength and $1/4$ -wave resonance from the winding length for a 50 mm pipe.

—	$d_{01} = 0.35 \text{ mm}$, $D = 5 \text{ cm}$, LC-resonance
- - -	The same. $1/4$ -wave resonance. $K = 1$
- . - .	The same. $1/4$ -wave resonance. $K = 0.8$
—	$d_{01} = 0.56 \text{ mm}$, $D = 5 \text{ cm}$, LC-resonance
- - -	The same. $1/4$ -wave resonance, $K = 1$
- . - .	The same. $1/4$ -wave resonance, $K = 0.8$

Из графиков следует, что для каждого из двух проводов существует длина намотки, при которой LC- и $1/4$ -волновой резонансы совпадают. Эта длина зависит от

коэффициента замедления волны и находится между точками пересечения пунктирных линий со сплошной линией того же цвета. Осталось проверить это на практике, отматывая витки с уже имеющихся катушек.

Заметим, что для обоих проводов совпадение резонансов возможно при длине намотки, близкой к диаметру трубы. При этом использованная нами формула (3) имеет пониженную точность.

1.3.2. Интересно построить аналогичные графики для другого диаметра трубы, например, 32 мм. Для этого необходимо по формуле (2) рассчитать собственную ёмкость катушек на трубе диаметром 32 мм для обоих проводов.

Приводить здесь расчёты ёмкостей не будем. Рассчитанные значения занесены в таблицу 1.

А расчёты длины волны повторим. Чтобы можно было потом проверить.

- для провода $d_{01} = 0,35$ мм:

$$\lambda_{LC1} = 299792458 * 2 * \pi * 10^{-3} * 0,1 * (h/0,04) * \sqrt{[3,24 * 1,95 * 10^{-12} / (h/3,24 + 0,44)]} = 0,299792458 * 2 * \pi * 2,5 * h * 2,5 / \sqrt{(h/3,24 + 0,44)} = 11,77 * h / \sqrt{(h/3,24 + 0,44)} \quad (9)$$

- для провода $d_{02} = 0,56$ мм:

$$\lambda_{LC2} = 299792458 * 2 * \pi * 10^{-3} * 0,1 * (h/0,063) * \sqrt{[3,263 * 2,23 * 10^{-12} / (h/3,263 + 0,44)]} = 0,299792458 * 2 * \pi * 1,613 * h * 2,67 / \sqrt{(h/3,263 + 0,44)} = 8,11 * h / \sqrt{(h/3,263 + 0,44)} \quad (10)$$

И для $1/4$ -волнового резонанса:

- для провода $d_{01} = 0,35$ мм:

$$\lambda_{ЧВ1} = 4 * \pi * (D + d_1) * 0,01 * h / d_1 = 4 * \pi * 0,0324 * 0,01 * h / 0,0004 = 10,06 * h; \quad (11)$$

- для провода $d_{02} = 0,56$ мм:

$$\lambda_{ЧВ2} = 4 * \pi * (D + d_2) * 0,01 * h / d_2 = 4 * \pi * 0,03263 * 0,01 * h / 0,00063 = 6,49 * h. \quad (12)$$

From the graphs it can be seen, that for each of the two wires, there is a winding length, at which LC- and $1/4$ -wave resonances match. This length depends on the deceleration rate of the wave and can be found between the points where the dotted lines meet the solid lines of the same colour. It remains to check this in practice, by unwinding turns from already existing coils.

We will point out, that for both wires the matching of the resonances is possible with a winding length which is close to the pipe diameter. In so doing, the formula which we used (3) has a lowered accuracy.

1.3.2 It is interesting to plot similar charts for a different pipe diameter, for example, 32 mm. For this it is necessary to calculate the coils capacitance on the 32 mm diameter pipe using formula (2) for both wires.

We are not going to calculate the capacitances here. The calculated values can be found in Table 1.

But we will repeat the calculations for the wavelength. So that we can check it later.

- for wire $d_{01} = 0.35$ mm:

$$\lambda_{LC1} = 299792458 * 2 * \pi * 10^{-3} * 0.1 * (h/0.04) * \sqrt{[3.24 * 1.95 * 10^{-12} / (h/3.24 + 0.44)]} = 0.299792458 * 2 * \pi * 2.5 * h * 2.5 / \sqrt{(h/3.24 + 0.44)} = 11.77 * h / \sqrt{(h/3.24 + 0.44)} \quad (9)$$

- for wire $d_{02} = 0.56$ mm:

$$\lambda_{LC2} = 299792458 * 2 * \pi * 10^{-3} * 0.1 * (h/0.063) * \sqrt{[3.263 * 2.23 * 10^{-12} / (h/3.263 + 0.44)]} =$$

$$= 0.299792458 * 2 * \pi * 1.613 * h * 2.67 / \sqrt{(h/3.263 + 0.44)} = 8.11 * h / \sqrt{(h/3.263 + 0.44)} \quad (10)$$

And for the $\frac{1}{4}$ -wave resonance:

- for wire $d_{01} = 0.35$ mm:

$$\lambda_{WF1} = 4 * \pi * (D + d_1) * 0.01 * h / d_1 = 4 * \pi * 0.0324 * 0.01 * h / 0.0004 = 10.06 * h; \quad (11)$$

- for wire $d_{02} = 0.56$ mm:

$$\lambda_{WF2} = 4 * \pi * (D + d_2) * 0.01 * h / d_2 = 4 * \pi * 0.03263 * 0.01 * h / 0.00063 = 6.49 * h. \quad (12)$$

Графики зависимости длины волны с частотой LC-резонанса от длины намотки и длины волны $\frac{1}{4}$ -волнового резонанса в проводе катушки, намотанной на круглой трубе диаметром 32 мм, представлены на рисунке 3.

The graphs of the LC-resonance frequency wavelength from the winding length and the $\frac{1}{4}$ -wave resonance wavelength in the wire of the coil, wound on a round 32 mm diameter pipe, are shown in Figure 3.

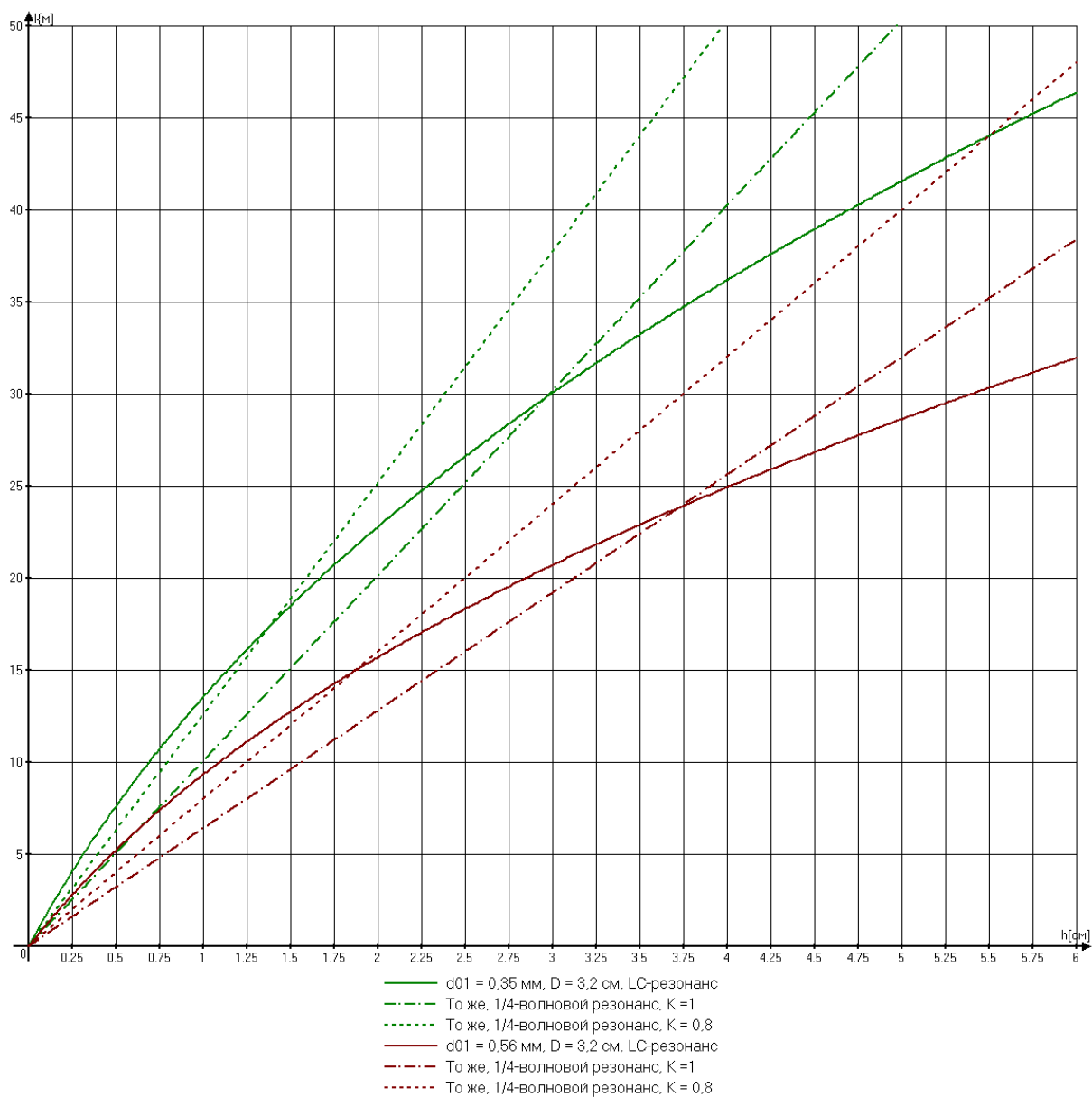


Рис. 3. Графики зависимости длины волны с частотой LC-резонанса и $1/4$ -волнового резонанса от длины намотки для трубы 32 мм.

Fig. 3. The graph of the LC-resonance frequency wavelength and $1/4$ -wave resonance from the winding length for a 32 mm pipe.

- $d_{01} = 0.35$ mm, $D = 3.2$ cm. LC-resonance
- - - The same. $1/4$ -wave resonance. $K = 1$
- - - The same. $1/4$ -wave resonance. $K = 0.8$
- $d_{01} = 0.56$ mm, $D = 3.2$ cm. LC-resonance
- - - The same. $1/4$ -wave resonance. $K = 1$
- - - The same. $1/4$ -wave resonance. $K = 0.8$

1.3.3. И посмотрим ещё, что можно получить на трубе диаметром 110 мм.

Рассчитанные значения собственной ёмкости также занесены в таблицу 1.

- для провода $d_{01} = 0,35$ мм:

$$\lambda_{LC1} = 299792458 * 2 * \pi * 10^{-3} * 0,1 * (h/0,04) * \sqrt{[11,04 * 6,69 * 10^{-12} / (h/11,04 + 0,44)]} =$$

$$= 0,299792458 * 2 * \pi * 2,5 * h * 8,58 / \sqrt{(h/11,04 + 0,44)} = 40,40 * h / \sqrt{(h/11,04 + 0,44)} \quad (13)$$

- для провода $d_{02} = 0,56$ мм:

$$\lambda_{LC2} = 299792458 * 2 * \pi * 10^{-3} * 0,1 * (h/0,063) * \sqrt{[11,063 * 7,66 * 10^{-12} / (h/11,063 + 0,44)]} =$$

$$= 0,299792458 * 2 * \pi * 1,613 * h * 9,18 / \sqrt{(h/11,063 + 0,44)} = 27,89 * h / \sqrt{(h/11,063 + 0,44)} \quad (11)$$

И для $\frac{1}{4}$ -волнового резонанса:

- для провода $d_{01} = 0,35$ мм:

$$\lambda_{CB1} = 4 * \pi * (D + d_1) * 0,01 * h / d_1 = 4 * \pi * 0,1104 * 0,01 * h / 0,0004 = 34,68 * h; \quad (15)$$

- для провода $d_{02} = 0,56$ мм:

$$\lambda_{CB2} = 4 * \pi * (D + d_2) * 0,01 * h / d_2 = 4 * \pi * 0,11063 * 0,01 * h / 0,00063 = 22,07 * h. \quad (16)$$

Вид формул для программы AGrapher: $40.40 * x / \sqrt{(x/11 + 0.44)}$

$34.68 * x \quad 34.68 * x / 0.8$

$27.89 * x / \sqrt{(x/11 + 0.44)} \quad 22.07 * x \quad 22.07 * x / 0.8$

Графики для трубы диаметром 110 мм, представлены на рисунке 4.

1.3.3 And let's see also, what we can get from a 110 mm diameter pipe. The calculated values of its own capacitance are also found in Table 1.

- for wire $d_{01} = 0.35$ mm:

$$\lambda_{LC1} = 299792458 * 2 * \pi * 10^{-3} * 0.1 * (h/0.04) * \sqrt{[11.04 * 6.69 * 10^{-12} / (h/11.04 + 0.44)]} =$$

$$= 0.299792458 * 2 * \pi * 2.5 * h * 8.58 / \sqrt{(h/11.04 + 0.44)} = 40.40 * h / \sqrt{(h/11.04 + 0.44)} \quad (13)$$

- for wire $d_{02} = 0.56$ mm:

$$\lambda_{LC2} = 299792458 * 2 * \pi * 10^{-3} * 0.1 * (h/0.063) * \sqrt{[11.063 * 7.66 * 10^{-12} / (h/11.063 + 0.44)]} =$$

$$= 0.299792458 * 2 * \pi * 1.613 * h * 9.18 / \sqrt{(h/11.063 + 0.44)} = 27.89 * h / \sqrt{(h/11.063 + 0.44)} \quad (11)$$

And for the $\frac{1}{4}$ -wave resonance:

- for wire $d_{01} = 0.35$ mm:

$$\lambda_{WF1} = 4 * \pi * (D + d_1) * 0.01 * h / d_1 = 4 * \pi * 0.1104 * 0.01 * h / 0.0004 = 34.68 * h; \quad (15)$$

- for wire $d_{02} = 0.56$ mm:

$$\lambda_{WF2} = 4 * \pi * (D + d_2) * 0.01 * h / d_2 = 4 * \pi * 0.11063 * 0.01 * h / 0.00063 = 22.07 * h. \quad (16)$$

The formulas for the programme AGrapher: $40.40 * x / \sqrt{(x/11 + 0.44)}$

$34.68 * x \quad 34.68 * x / 0.8$

$27.89 * x / \sqrt{(x/11 + 0.44)} \quad 22.07 * x \quad 22.07 * x / 0.8$

The graphs for the 110 mm diameter pipe, are shown in Figure 4.

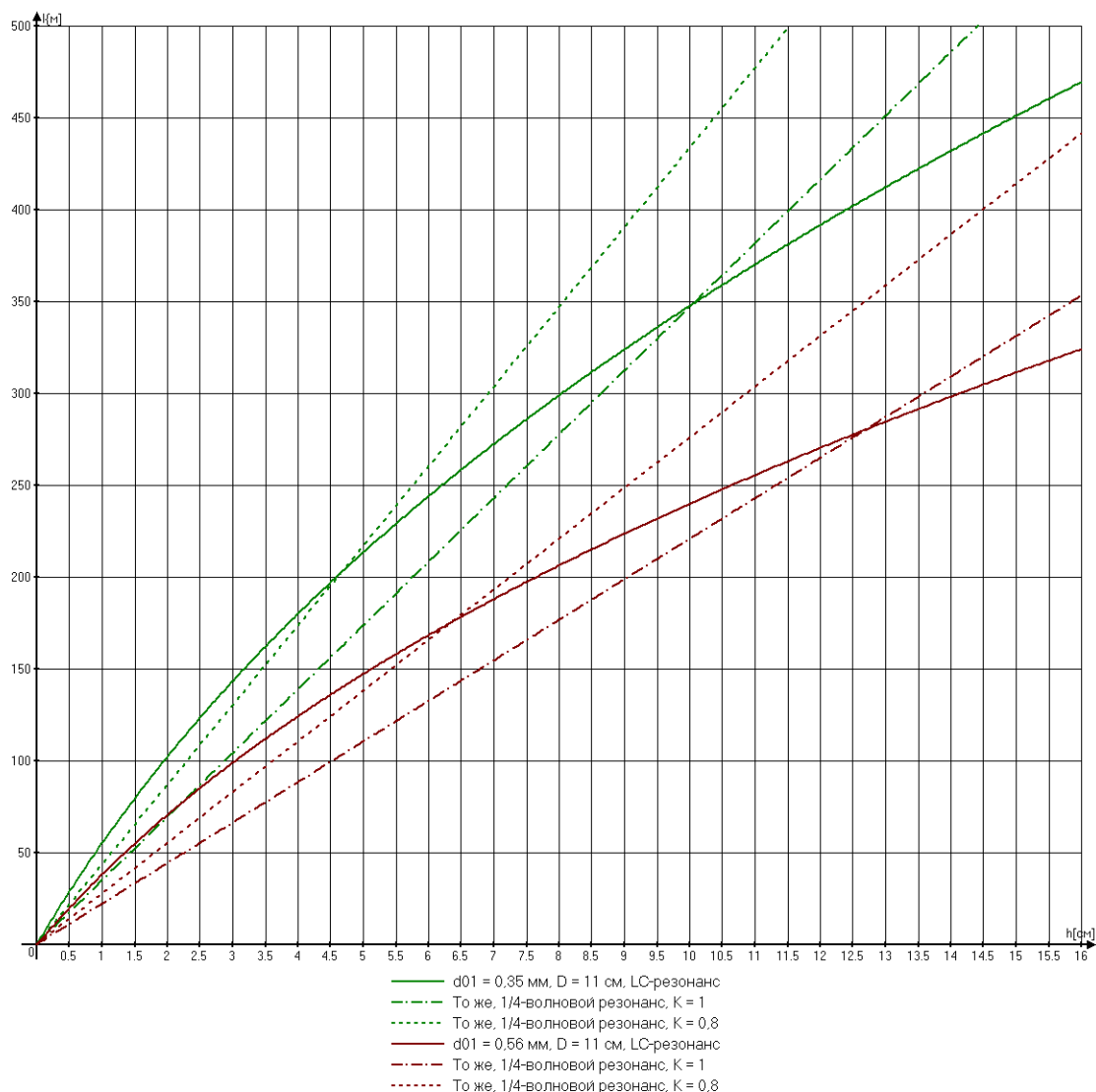


Рис. 4. Графики зависимости длины волны с частотой LC-резонанса и $1/4$ -волнового резонанса от длины намотки для трубы 110 мм.

Figure 4. The graph of the LC-resonance frequency wavelength and $1/4$ -wave resonance from the winding length for a 110 mm pipe.

- $d_{01} = 0.35 \text{ mm}$, $D = 11 \text{ cm}$, LC-resonance
- - - - - The same. $1/4$ -wave resonance. $K=1$
- The same. $1/4$ -wave resonance. $K=0.8$
- $d_{01} = 0.56 \text{ mm}$, $D = 11 \text{ cm}$, LC-resonance
- - - - - The same. $1/4$ -wave resonance. $K=1$
- The same. $1/4$ -wave resonance. $K=0.8$

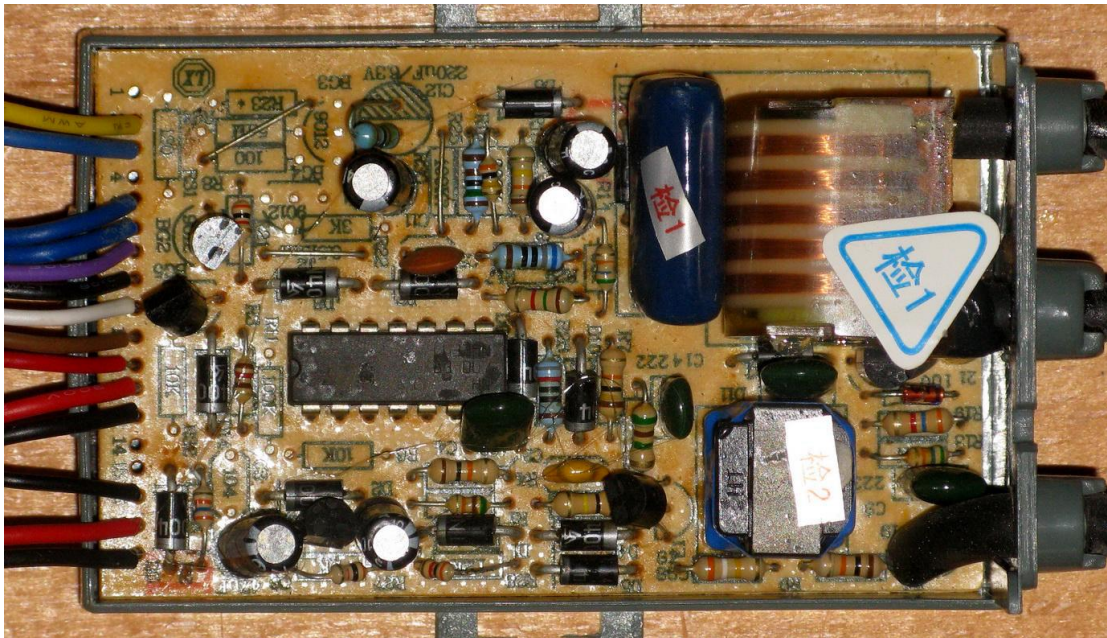
2. Проверим, насколько графики соответствуют действительности. Для этого будем брать ранее намотанные катушки и, отматывая с них провода, постараемся совместить LC- и $1/4$ -волнового резонансы.

Кацер использовать не будем. Будем использовать для этой цели блок розжига для газовых колонок, как это делал Капанадзе в видео установки на 200 Вт (см. рисунок 5).

А вот после совмещения резонансов поставим катушку в качер, и посмотрим, насколько пригоден качер для возбуждения катушки Теслы.

2. Let's check, how much the graphs correspond to reality. For this we are going to take the coils we had previously wound and, unwinding wires from them, we will try to match the LC- and $\frac{1}{4}$ -wave resonances.

We are not going to use a kacher (*I think this refers to a Brovin/Kacher generator [a single transistor oscillator]*). Since I have not found a translation for it, I will continue to refer to it as a kacher). We are going to use for the above goal an ignition unit for water heaters, like Kapanadze did in the video installation for 200 W (see Figure 5). And after we have matched the resonances we will place the coil into the kacher, and we will see, how useful the kacher is for the excitation of the Tesla coil.



a)

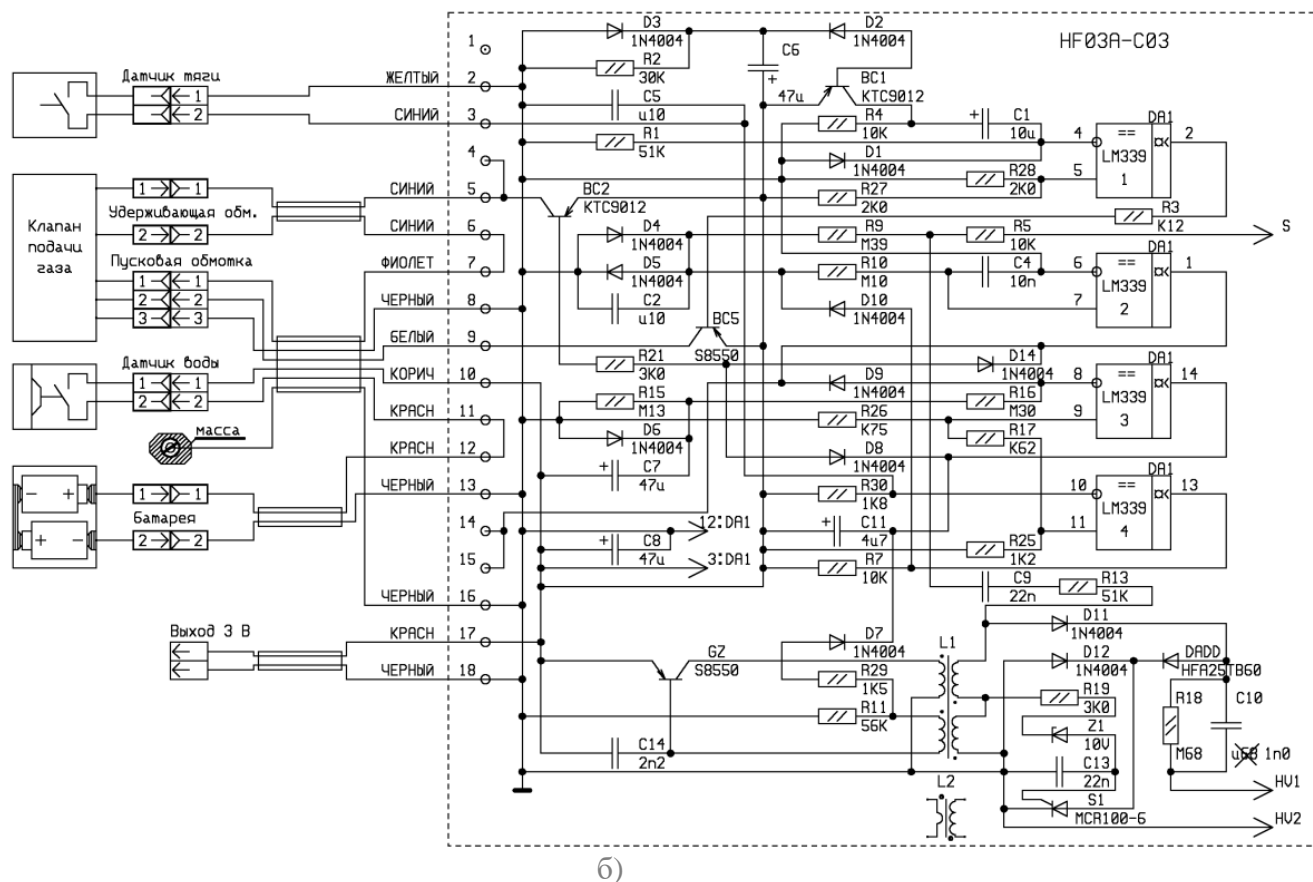


Рис. 5. Блок розжига для газовых колонок,
а) – внешний вид без крышки, б) – принципиальная схема.

Fig. 5. The ignition unit for water heaters, а) – outward appearance without the lid, б) – schematic diagram

Translation of words in diagram:

Gas supply valve	Thrust sensor	Yellow
	Seal-in coil	Blue
	Starting winding	Blue
	Water sensor	Blue
	Mass	Purple
	Battery	Black
	Output	White
		Brown
		Red
		Red
		Black
		Black
		Red

		Black
--	--	-------

Блок немного переделан по результатам исследования. В нём удалена выходная катушка. Вместо неё включается индуктор катушки Теслы. А ёмкость конденсатора C10 уменьшена для того, чтобы ток в тиристоре S1 не превышал предельно допустимого. Схема эксперимента показана на рисунке 6.

The ignition unit was slightly changed as a result of the research. The output coil was taken out. Instead of it the [inductor / induction coil] of the Tesla coil was inserted. And the capacitance of the capacitor C10 was decreased, so that the current in the thyristor S1 did not exceed the maximum permissible. The circuit diagram is shown in Figure 6.

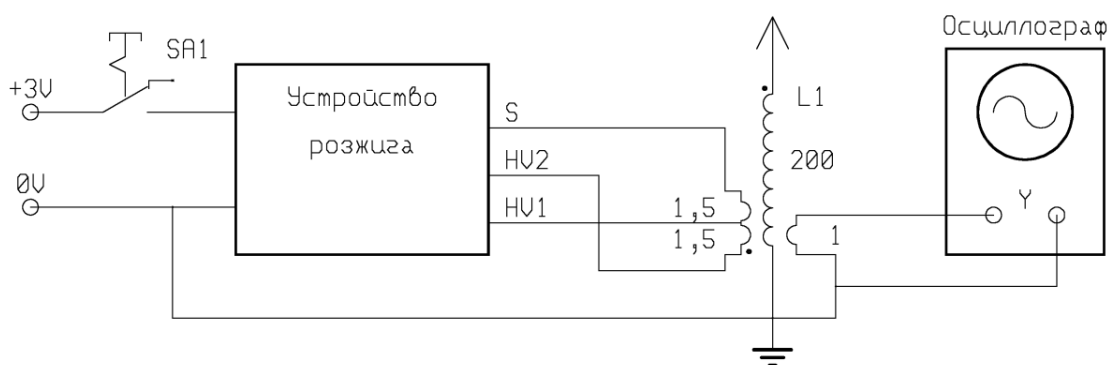


Рис. 6. Схема эксперимента.
Figure 6. The diagram circuit of the experiment.

Translation of words in diagram:

First box: Ignition device

Second box: Oscilloscope

Специально проведённое расследование показало, что съём сигнала на осциллограф лучше всего производить с одного витка провода, намотанного под первым витком заземлённого конца катушки. Верхний конец индуктора должен быть расположен не ближе, чем в 1 см от начала катушки. При таком расположении съёмного витка, его влияние на собственную ёмкость катушки минимально, и связь с индуктором достаточно слабая для того, чтобы он не оказывал заметного влияния на вид осциллограммы.

Кроме того, заготовлен кусок фольгированного стеклотекстолита размером 100 мм x 75 мм с заземлённой фольгой, который в процессе эксперимента использовался в качестве подстроечного конденсатора, для того, чтобы не «проскочить» совпадение резонансов. Периодически поднося фольгу к катушке, мы понижаем её резонансную частоту (LC) и по осциллограмме можем прогнозировать, что будет при удалении следующего витка. Более того, вообще не следует отматывать витки до полного совпадения резонансов, потому, что вернуть отрезанный кусок провода мы не сможем, а совместить резонансы с помощью такой пластины сможем всегда.

2.1. Первой испытывалась катушка с проводом 0,56 мм, которой соответствуют красные графики на рисунке 2. Длина намотки на начало эксперимента составляла 118 мм. Вид осциллограмм показан на рисунках 7 - 11.

A specially conducted experiment showed, that the pickup of the signal on to the oscilloscope is best done from one turn of the wire, wound under the first turn of the coil of the earthed end of the coil. The top end of the [inductor / induction coil] must be located not any closer than 1 cm from the beginning of the coil. From this position of the [removable turn / turn which has been removed], its effect on the coil capacitance is minimal, and the connection with the [inductor / induction coil] is weak enough so as not to cause a noticeable impact on the appearance of the oscillogram.

Besides that, a piece of foil-coated [glass fibre / glass fibre laminate] the size of 100 mm x 75 mm with an earthed foil, which in the process of the experiment was used as a [trimming capacitor / tuning capacitor] in order not to “overshoot” the point where the resonances match. Periodically bringing the foil to the coil, we lower its resonance frequency (LC) and using the oscillogram can predict, what will happen when we remove the next turn of the coil. Moreover, do not start to remove the turns of the coil until the resonances match, because it is not possible to return the piece of wire which has been cut off, whilst we will always be able to match the resonances with the help of such a plate.

2.1 We first tested the coil with the 0.56 mm wire, which correlates to the red lines on Figure 2. The winding length at the start of the experiment was 118 mm. The oscillograms can be seen in Figures 7-11.

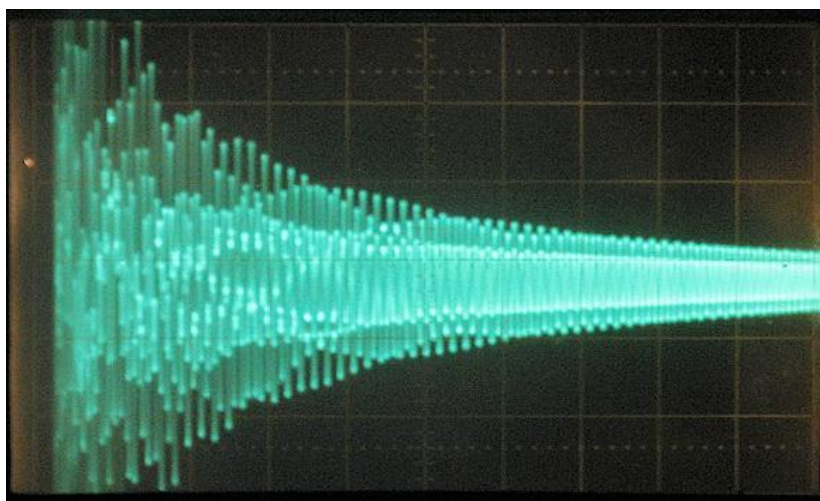


Рис. 7. Осциллограмма при длине намотки 118 мм.
Установки: X = 2 мкс/дел, Y = 0,2 в/дел.

Как видим, в сигнале присутствует несколько затухающих процессов.

Fig. 7. Oscillogram when the length of the winding is 118 mm

Settings: X = 2 microseconds/division, Y = 0.2 volt/division.

As we can see, there are several damping processes in the signal.

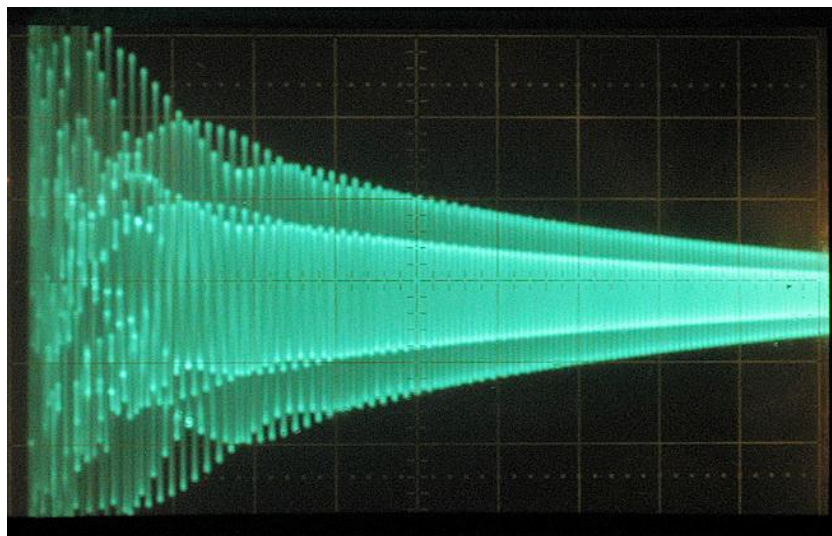


Рис. 8. Осциллограмма при длине намотки 93 мм.
Установки: $X = 2$ мкс/дел, $Y = 0,2$ в/дел.

По мере приближения к совпадению резонансов амплитуда сигнала возросла, сигналы стали более упорядоченными. А при отмотке ещё одного витка биения вдруг прекратились. Это что, совпадение резонансов?

Fig. 8. Oscillogram when the length of the winding is 93 mm
Settings: $X = 2$ microseconds/division, $Y = 0.2$ volt/division.

As the resonances moved towards matching, the amplitude of the signal increased, and the signals became more ordered. And when one more turn of the coil was unwound the beats suddenly stopped. What's that, the matching of the resonances?

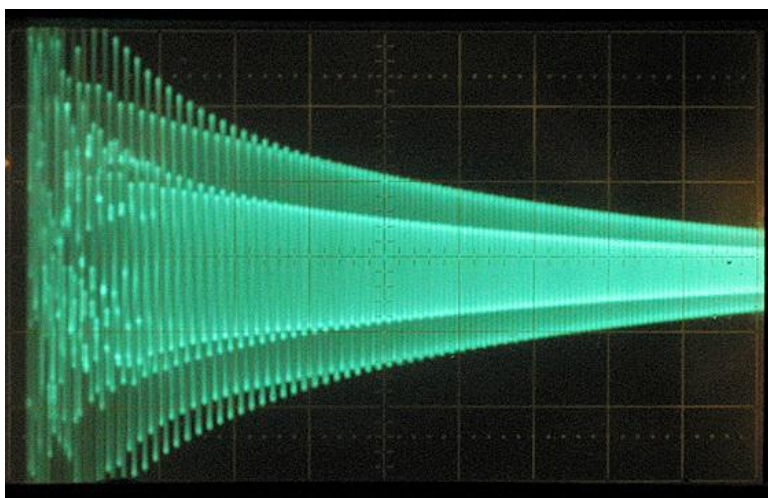
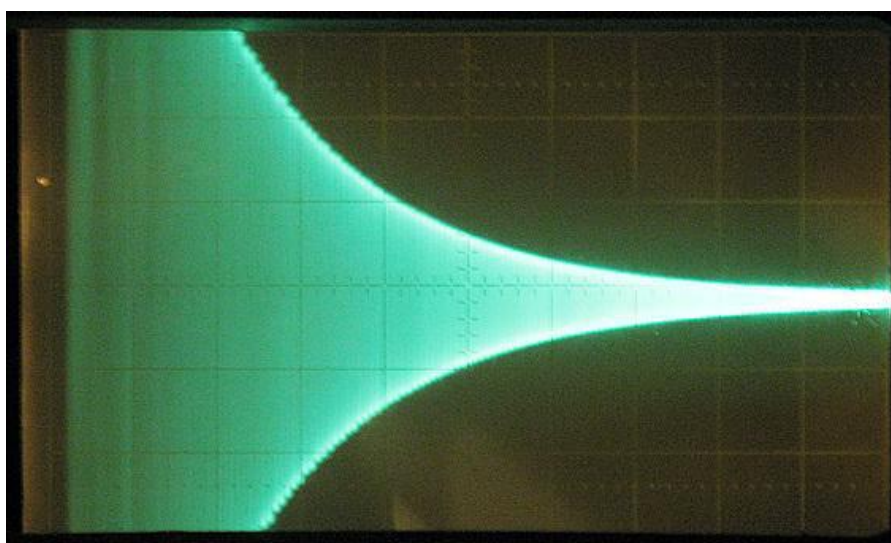


Рис. 9. Осциллограмма при длине намотки 92 мм.
Установки: $X = 2$ мкс/дел, $Y = 0,2$ в/дел.

Попробуем теперь настроить индуктор в резонанс с катушкой. В том же масштабе результат выглядит так:

Fig. 9. Oscillogram when the length of the winding is 92 mm
Settings: X = 2 microseconds/division, Y = 0.2 volt/division.

Now we are going to try to tune the [inductor / induction coil] into resonance with the coil. In the same scale the result looks like this:



\\
Рис. 10. Осциллограмма при длине намотки 92 мм. Индуктор в резонансе.
Установки: X 2 мкс/дел, Y = 0,2 в/дел.

Та же осциллограмма более подробно:

Fig. 10. Oscillogram when the length of the winding is 92 mm. The [inductor / induction coil] is in resonance.
Settings: X = 2 microseconds/division, Y = 0.2 volt/division.

The same oscillogram in more detail:

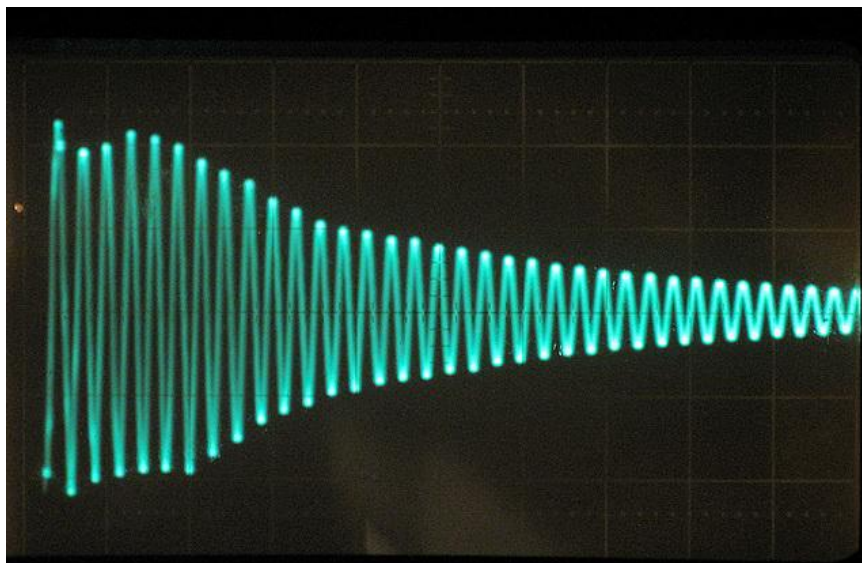


Рис. 10. Осциллограмма при длине намотки 92 мм. Индуктор в резонансе.
Установки: $X = 0,5$ мкс/дел, $Y = 1,0$ в/дел.

Fig. 10. Oscillogram when the length of the winding is 92 mm. The inductor is in resonance.
Settings: $X = 0.5$ microseconds/division, $Y = 1.0$ volt/division.

Очевидно, амплитуда колебаний существенно возросла, но зато колебания стали затухать быстрее. Ёмкость конденсатора, включённого параллельно индуктору при его резонансе, оказалась равной 2525 пФ, но нам неизвестна ёмкость, которую вносит схема накачки.

Установим теперь катушку с совмещёнными резонансами в качер. Качер запустился на частоте 3,901 МГц. Расчётная величина $\frac{1}{4}$ - волнового резонанса, даже при коэффициенте замедления волны равном единице, при этом получилась 3,21 мГц. То есть, это не совпадение резонансов, но картинку я привожу, чтобы было с чем сравнить, когда мы совместим резонансы.

2.2. Вернём катушку на место, уберём конденсатор с индуктора и продолжим попытку совмещения резонансов.

Сначала, при отмотке и отрезания провода с катушки, осциллограммы имеют вид, аналогичный рисунку 8, с различными вариациями. При подходе к совпадению резонансов амплитуда стала плавно возрастать и появились биения, как показано на рисунке 11.

Evidently, the oscillation amplitude increased substantially, but the oscillations began to damp quicker. The capacitor capacitance, switched on in parallel to the [inductor / induction coil] at its resonance, was equal to 2525 pF, but we do not know the capacitance which is brought by the pump circuit.

Now we will place the coil with the combined resonance into the kacher. The kacher has started at the frequency of 3.901 MHz. The calculated value of the $\frac{1}{4}$ -wave resonance, even with the deceleration rate of the wave equal to one, still comes out at 3.21 MHz. i.e. this is not the matching of the resonances, but I am including the pictures, so that we have them as a comparison for when we do match the resonances.

2.2 Let's put the coil back in its place, take the capacitor off the [inductor / induction coil] and continue with the attempt to match resonances.

First, at the stage of unwinding and cutting the wire from the coil, the oscillograms look similar to Figure 8, with different variations. As the resonances got close to matching, the amplitude began to smoothly increase and the beats appeared, as shown in Figure 11.

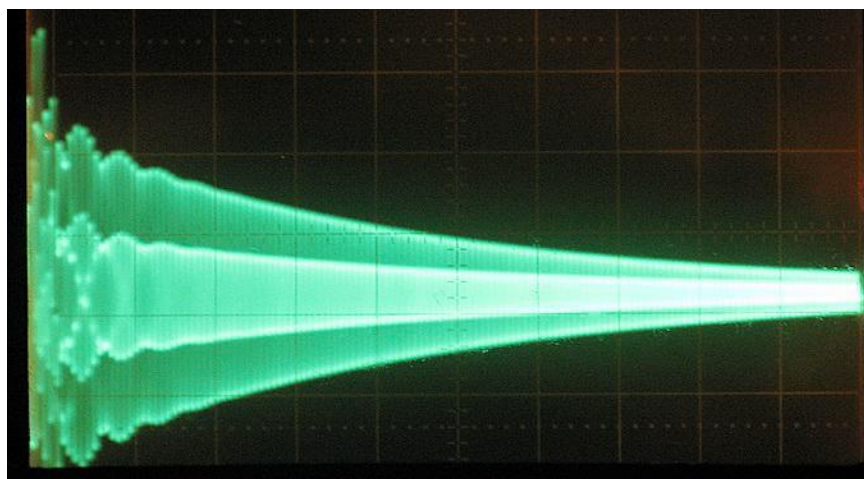


Рис. 11. Осциллограмма при длине намотки 45 мм.
Установки: $X = 2$ мкс/дел, $Y = 0,5$ в/дел.

Ещё через несколько витков биения пропали. Тот же вопрос: - Это что, совпадение резонансов? Осциллограмма представлена на рисунке 12.

Fig. 11. Oscillogram when the length of the winding is 45 mm.
Settings: $X = 2$ microseconds/division, $Y = 0.5$ volt/division.

In just a few more turns of the coil the beats disappeared. The same question: - What is this, the matching of the resonances? The oscillogram is shown in Figure 12.

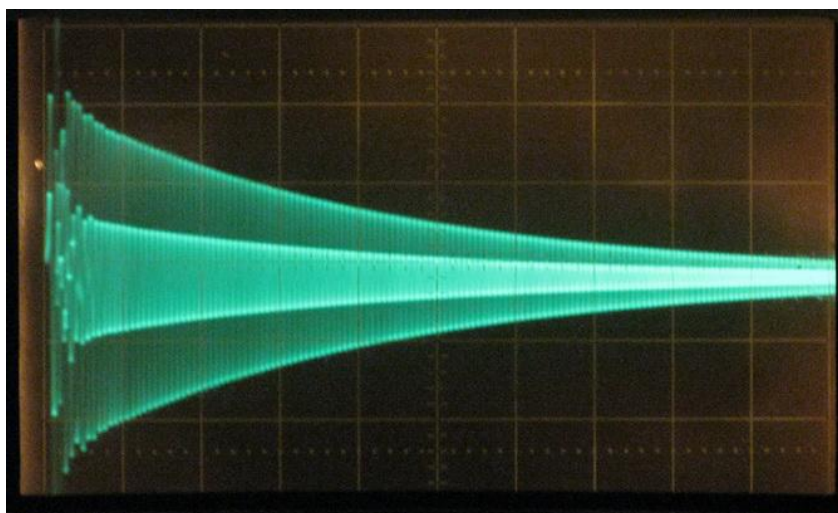


Рис. 12. Осциллограмма при длине намотки 40 мм.
Установки: $X = 2$ мкс/дел, $Y = 0,5$ в/дел.

Попробуем опять настроить индуктор в резонанс с катушкой. При настройке возникают сильные биения, которые просто подбором конденсатора устранить не удаётся. Настроил на максимум амплитуды. Осциллограмма - на рисунке 13.

Fig. 12. Oscillogram when the length of the winding is 40 mm.
Settings: X = 2 microseconds/division, Y = 0.5 volt/division.

Let's try to once again tune the [inductor / induction coil] into resonance with the coil. During the tuning strong beats appear, which we are not able to get rid of with just the capacitor selection. Tuned to the maximum amplitude. The oscillogram is shown in Figure 13.

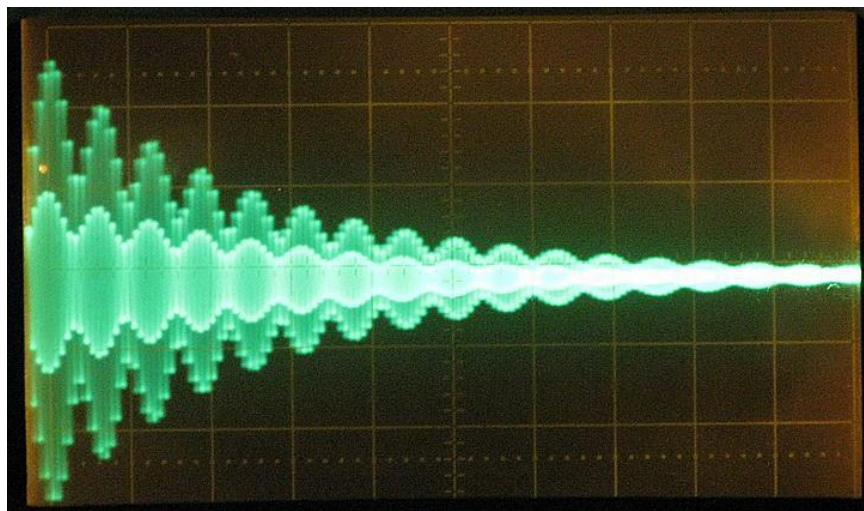


Рис.13. Осциллограмма при длине намотки 40 мм. Индуктор в резонансе.
Установки: X = 2 мкс/дел, Y = 2,0 в/дел.

Расследование показало, что недостаточно отмотано витков. Обрезание ещё нескольких витков привело к устранению биений, - показано на рисунке 14.

Fig. 13. Oscillogram when the length of the winding is 40 mm. The [inductor / induction coil] is in resonance.
Settings: X = 2 microseconds/division, Y = 2.0 volt/division.

The experiment showed, that not enough turns had been unwound. The cutting off of a few more turns caused the beats to disappear, - as shown in Figure 14.

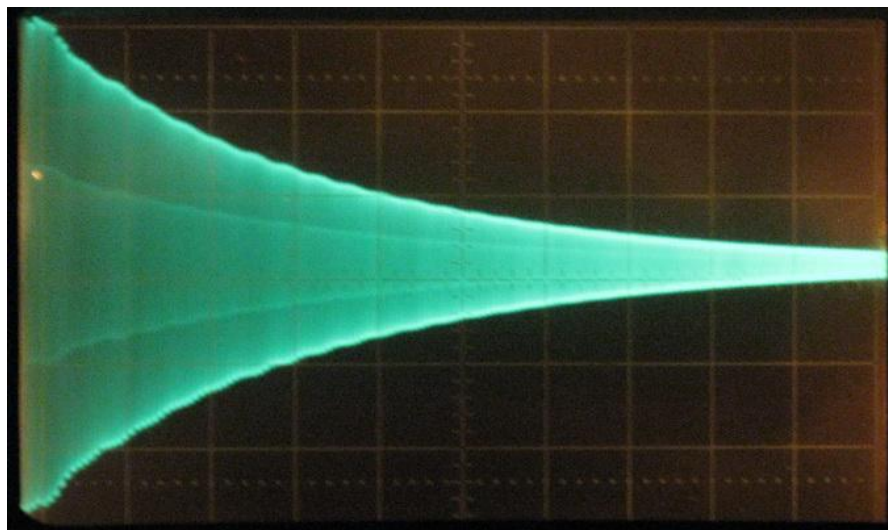


Рис.14. Осциллограмма при длине намотки 38 мм. Индуктор в резонансе.
Установки: $X = 2$ мкс/дел, $Y = 1,0$ в/дел.

Оказалось, что точной настройки можно добиться, не отрезая конец провода, а просто складывая его вдоль самого провода в обратном направлении.

И, наконец, на рисунке 15 та же осциллограмма более подробно.

Fig. 14. Oscillogram when the length of the winding is 38 mm. The [inductor / induction coil] is in resonance.

Settings: $X = 2$ microseconds/division, $Y = 1.0$ volt/division.

It turned out that the exact tuning can be achieved without cutting the end of the wire, but by just folding it back along the wire itself.

And, finally, Figure 15 shows the same oscillogram in more detail.

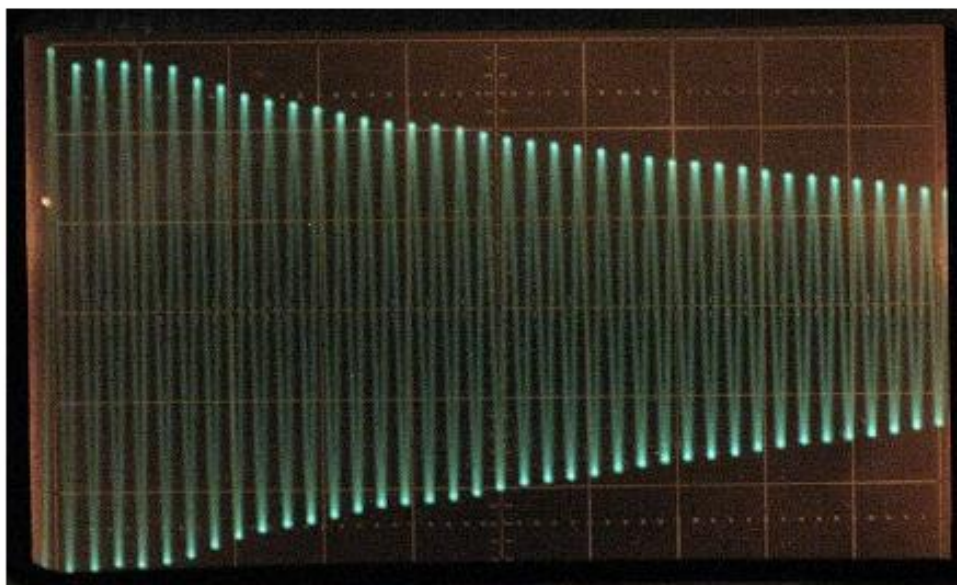


Рис. 15. Осциллограмма при длине намотки 38 мм. Индуктор в резонансе.
Установки: $X = 0,5$ мкс/дел, $Y = 1,0$ в/дел.

Очевидно, что при сравнении её с осциллограммой, представленной на рисунке 10 в том же масштабе, когда индуктор был в резонансе с LC-контуром, энергии здесь гораздо больше: – и начальная амплитуда больше, и затухание не такое быстрое. Измерение частоты и расчёты показали, что это действительно совпадение резонансов. Коэффициент замедления оказался равным 0,848 – очень близко к значению 0,85, полученному в первых опытах.

Fig. 15. Oscillogram when the length of the winding is 38 mm. The [inductor / induction coil] is in resonance.

Settings: $X = 0.5$ microseconds/division, $Y = 1.0$ volt/division.

It is apparent that when compared to the oscillogram presented in Figure 10 using the same scale, when the [inductor / induction coil] was in resonance with the LC-circuit, there was much more energy here: - both the beginning amplitude was higher, and the damping was not as quick. The measurements of the frequency and the calculations showed, that this was indeed the matching of the resonances. The deceleration rate was equal to 0.848 – very close to the figure of 0.85, which was obtained in initial tests.

3. Ещё один этап работы можно считать законченным.

Надо отметить, что проведённые работы и выводы касаются только катушек со сплошной намоткой проводом в эмалевой изоляции. Для проводов в пластмассовой изоляции картина совершенно другая. У них гораздо больше собственная ёмкость катушки.

Проверка показала правильность графиков, позволяющих оценить, при какой длине намотки возможно совмещение резонансов. Для каждого конкретного случая теперь уже нетрудно построить свои графики и оценить, сколько провода надо мотать на трубу.

И стало непонятно, как некоторые теслостроители утверждают, что у них что-то там получилось, когда их длинная катушка с тонким проводом в принципе не может выполнить условия, сформулированные Теслой.

И ещё. Можно понять, почему не у всех повторителей Дона Смита есть положительные результаты. У одних катушка попала в три резонанса, а другие немного промахнулись. Можно, конечно, посчитать и тоже нарисовать графики, но пусть это делают те, кто строит Дона Смита.

И в заключение прилагаю таблицу из Excel, в которой параллельно проводились проверочные расчёты. Из неё, например, видно, насколько начинают врать некоторые формулы при сокращении длины намотки. И вообще, для общего развития – а вдруг кому пригодится. А если кто будет пользоваться такой метод, не вздумайте считать на калькуляторе. Замучаетесь исправлять ошибки. Перенесите формулы в табличку в Excel – он всё Вам посчитает.

Всем удачи! =Multik из Мультикона.=

3. We can consider one more stage of the operation finished.

It is necessary to point out, that the conducted experiments and results apply only to coils with a pull-through winding wire in enamel insulation. For wires in plastic insulation the picture is

completely different. In that case the coil capacitance is much greater.

The test showed the correctness of the graphs, which allowed to estimate, at which winding length the matching of the resonances is possible. It is now not difficult to plot the graphs for each individual case and estimate, how much wire to wind round the pipe.

And it became incomprehensible, how some tesla-builders claim that they have achieved something, when their long coil with a thin wire basically cannot meet the conditions, formulated by Tesla.

And also. It can be understood, why not all of the copyers of Don Smith have positive results. With some, the coil has ended up with three resonances, while the others have missed it. Of course, it is possible to calculate and also plot the graphs, but let those do that, that want to build a Don Smith.

And finally I am attaching an Excel table, which was used in parallel to make the checking calculations. From it, for example, can be seen, how some formulas start to lie as the length of the winding decreases. And generally – for everyone's overall development – in case this is useful to anyone. And if anyone wants to use this method, do not even think about using a calculator. You will get fed up of correcting mistakes. Copy the formulas into an Excel table – Excel will calculate it all for you. Good luck everyone! =Multik from Multikon =

Таблица 3 Результаты измерений и расчётов параметров катушек.

№ п/ п	Длина намотки, см	Коли- чество витков	Индуктив ность, мкГн		Собствен- ная ёмкость, пФ	Частота, МГц				Длина волны , м		
			Измерен- ная	Рассчитан- ная		LC-резонанса		¼-волнового		LC- резонанс а	¼-волнового	
						Изме- рен- ная	Рассчитан ная	При Кз` = 1	При Кз`=0,85		При Кз`=1	При Кз`=0,85
1	2	3	4		5	6		7		8	9	10
Диаметр каркаса D =0,05 м, диаметр провода d = 0,00040 м												
2	12,48	312	1705	1682	3,095	2,191	2,226	1,517	1,289	136,829	197,604	232,475
	10	250	1298	1299	3,054	2,528	2,533	1,893	1,609	118,589	158,336	186,278
	8,2	205	1024	1024	2,727	3,012	2,853	2,309	1,963	99,533	129,836	152,748
3		0		0	#ДЕЛ/0!		#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	0#ДЕЛ/0!	0#ДЕЛ/0!	0	0
Диаметр каркаса D =0,05 м, диаметр провода d = 0,00062 м												
4	12,64	200	700	694	3,494	3,218	3,239	2,356	2,003	93,161	127,247	149,702
5	9,3	147	480	484	3,468	3,901	3,878	3,205	2,724	76,85	93,527	110,032
6	6,76	107	330	328	3,91	4,431	4,711	4,404	3,743	67,658	68,077	80,091
7	6,3	100	302	300	3,624	4,811	4,926	4,712	4,005	62,314	63,624	74,852

8	5,5	87	246	252	3,737	5,249	5,374	5,416	4,604	57,114	55,352	65,12
9	5	79	212	223	3,836	5,581	5,713	5,964	5,069	53,717	50,263	59,133
10	4,5	71	184	194	3,809	6,012	6,125	6,637	5,641	49,866	45,173	53,145
11	3,8	60	144	154	3,975	6,652	6,875	7,853	6,675	45,068	38,174	44,911

Table 3 Results of measurements and calculations of the parameters of the coils

№	Length of winding, cm	Number of coils	Inductance, uH		Own capacitance , pF	Frequency, MHz				Length of wave, m		
			Measured	Calculated		LC-resonance		¼-wave resonance		LC-resonance	¼-wave resonance	
						Measured	Calculated	When K3' = 1	When K3' = 0.85		When K3' = 1	When K3' = 0.85
1	2	3	4		5	6		7		8	9	10
Diameter of the frame D =0.05 m, diameter of the wire d = 0.00040 m												
2	12.48	312	1705	1682	3.095	2.191	2.226	1.517	1.289	136.829	197.604	232.475
	10	250	1298	1299	3.054	2.528	2.533	1.893	1.609	118.589	158.336	186.278
	8.2	205	1024	1024	2.727	3.012	2.853	2.309	1.963	99.533	129.836	152.748
3		0		0				!			0	0
Diameter of the frame D =0.05 m, diameter of the wire d = 0.00062 m												
4	12.64	200	700	694	3.494	3.218	3.239	2.356	2.003	93.161	127.247	149.702
5	9.3	147	480	484	3.468	3.901	3.878	3.205	2.724	76.85	93.527	110.032
6	6.76	107	330	328	3.91	4.431	4.711	4.404	3.743	67.658	68.077	80.091
7	6.3	100	302	300	3.624	4.811	4.926	4.712	4.005	62.314	63.624	74.852
8	5.5	87	246	252	3.737	5.249	5.374	5.416	4.604	57.114	55.352	65.12
9	5	79	212	223	3.836	5.581	5.713	5.964	5.069	53.717	50.263	59.133
10	4.5	71	184	194	3.809	6.012	6.125	6.637	5.641	49.866	45.173	53.145
11	3.8	60	144	154	3.975	6.652	6.875	7.853	6.675	45.068	38.174	44.911

Проверка правильности идеи усиливающего передатчика, изложенной в патенте Н.Теслы № 787,412.

В результате проведённой работы, смысл которой отражён в документе «Поиск оптимального конструктива катушки Теслы», состоящем из двух частей, мы имеем представление о том, как нужно мотать катушку Теслы, чтобы выполнить условия, изложенные в патенте. Не полностью понятными остаются пока вопросы, связанные с конструкцией и правильным положением индуктора, и вопрос о том, что считать

точкой заземления, особенно если установка размещена в крупнопанельном доме, да ещё и не на первом этаже. Надеюсь, что в процессе дальнейших экспериментов эти вопросы будут сняты.

The examination of the correctness of the idea of the amplifying transmitter, described in N. Tesla's patent Number 787,412.

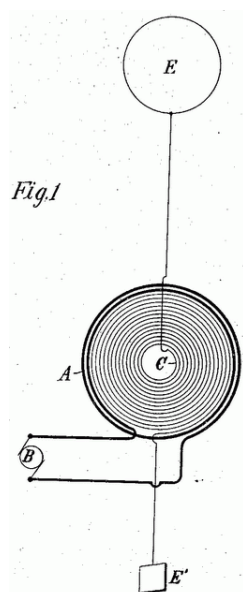
As a result of the work carried out, the meaning of which is reflected in the document “The Search for the optimum design of the Tesla coil,” containing two parts, we have an idea of how we have to wind the Tesla coil in order to meet the requirements outlined in the patent. We have not yet fully understood the questions to do with the design and the correct position of the [inductor / induction coil], and the question about what to consider as the grounding point, especially if the installation is located in a high-rise block of flats, and also not even on the ground floor. I hope, that in the process of further experiments we will solve all of these problems.

1. Постановка задачи.

Для того, чтобы «иметь всё под рукой», привожу здесь ключевую цитату из патента № 787412 в переводе Царева В.А., с небольшими уточнениями.

1. The formulation of the task.

In order to have “everything to hand”, I am including here the key quote from patent number 787412 as translated by Tsareva V.A., with some small elaborations. (*Note: I have copied & pasted the text from the actual patent, with the small elaborations added into the text*).



На Fig.1, А определяет первичную катушку, являющуюся частью трансформатора и состоящую вообще из нескольких витков толстого кабеля с мизерным сопротивлением, концы которого подключены к выводам источника сильных электрических колебаний, схематически представленного как В. Обычно этот источник - конденсатор, заряженный до высокого потенциала и в быстром темпе разряжающийся через первичку, как в малоизвестном типе трансформатора, изобретенного мной; но когда задумано получить стоячие волны больших длин,

может использоваться динамо-машина переменного тока подходящей конструкции, для накачки первички A . C - намотанная по спирали вторичная катушка внутри первички, чей ближайший к первичке вывод подключен к земле E' и другим выводом к поднятому терминалу E . Конструкция и габариты катушки C , определяющие ее период свободных колебаний, выбраны и настроены так, что вторичная система $E'CE$ находится в самом близком резонансе с колебаниями, производимый первичкой A .

Кроме того, для дополнительного увеличения подъёма давления и возрастания электрического движения во вторичной системе ($E'CE$), крайне важно, чтобы ее сопротивление было настолько маленьким, насколько это достижимо, а ее самоиндукция была как можно больше, при заданных условиях. Заземление должно быть выполнено с особой тщательностью, с целью уменьшения его сопротивления. Вместо того чтобы непосредственно заземлять (как на рисунке), катушку C можно подключить последовательно или иначе к первичке A , и уже первичку соединить с пластиной E' ; но в любом случае, подключая первичку целиком (все витки накачки), или часть ее или совсем не подключая к катушке C , полная длина проводника от пластины заземления E' до поднятого терминала E должна быть равной или нечетнократно равной одной четверти длины волны электровозмущения в системе $E'CE$. При соблюдении указанного соотношения, положение терминала E совпадет с точками максимального потенциала во вторичной цепи ($E'CE$), и в ней будет достигнута наибольшая амплитуда электроколебаний.

Чтобы увеличить электрическое "движение" во вторичной цепи в максимально возможной степени, очень важно, чтобы ее индуктивная связь с первичкой A не была очень сильной, как в обычных трансформаторах, а слабой, чтобы разрешить собственные свободные колебания - то есть, их взаимная индукция должна быть маленькой.

Спиральная форма обмотки C обеспечивает нужный эффект, когда только ближайшие к первичке A витки катушки C подвергаются сильному индуктивному действию и вырабатывают высокую начальную электродвижущую силу. При тщательном выполнении этих настроек и соотношений и строгом соблюдении других конструктивных особенностей, электрические колебания во вторичной системе, полученные от индуктивной накачки первичкой A , чрезвычайно усилятся, и это увеличение прямо пропорционально индуктивности и частоте и обратно пропорционально сопротивлению вторичной системы. Я нашел, что этим способом реально получить электрические колебания в тысячи раз большие, чем у начальных — то есть, колебаний накачки в первичке A - и я таким образом достиг показателей или уровней потока электроэнергии в системе $E'CE$, соизмеримой многими десятками тысяч лошадиных сил.

In Fig. 1, A designates a primary coil forming part of a transformer and consisting generally of a few turns of a stout cable of inappreciable resistance, the ends of which are connected to the terminals of a source of powerful electrical oscillations, diagrammatically represented by B . This source is usually a condenser charged to a high potential and discharged in rapid succession through the primary, as in a type of transformer invented by me and now well known; but when it is desired to produce stationary waves of great lengths an alternating

dynamo of suitable construction may be used to energize the primary A. C is a spirally-wound secondary coil within the primary having the end nearer to the latter connected to the ground E' and the other end to an elevated terminal E. The physical constants of coil C, determining its period of vibration, are so chosen and adjusted that the secondary system E' C E is in the closest possible resonance with the oscillations impressed upon it by the primary A.

It is, moreover, of the greatest importance in order to still further enhance the rise of pressure and to increase the electrical movement in the secondary system (E' C E), that its resistance be as small as practicable and its self-induction as large as possible under the conditions imposed. The ground should be made with great care, with the object of reducing its resistance. Instead of being directly grounded, as indicated, the coil C may be joined in series or otherwise to the primary A, in which case the latter will be connected to the plate E'; but be it that none or a part or all of the primary or exciting turns (all the turns of the excitation) are included in the coil C the total length of the conductor from the ground-plate E' to the elevated terminal E should be equal to one-quarter of the wave length of the electrical disturbance in the system E' C E or else equal to that length multiplied by an odd number. This relation being observed, the terminal E will be made to coincide with the points of maximum pressure in the secondary or excited circuit (E' C E), and the greatest flow of electricity will take place in the same.

In order to magnify the electrical movement in the secondary as much as possible, it is essential that its inductive connection with the primary A should not be very intimate, as in ordinary transformers, but loose, so as to permit free oscillation—that is to say, their mutual induction should be small. The spiral form of coil C secures this advantage, while the turns near the primary A are subjected to a strong inductive action and develop a high initial electromotive force. These adjustments and relations being carefully completed and other constructive features indicated rigorously observed, the electrical movement produced in the secondary system by the inductive action of the primary A will be enormously magnified, the increase being directly proportionate to the inductance and frequency and inversely to the resistance of the secondary system. I have found it practicable to produce in this manner an electrical movement thousands of times greater than the initial—that is, the one impressed upon the secondary by the primary A—and I have thus reached activities or rates of flow of electrical energy in the system E' C E measured by many tens of thousands of horsepower.

Сформулируем изложенную мысль кратко:

- необходимо, чтобы собственные колебания катушки находились в резонансе с колебаниями в индукторе, и чтобы в цепи, образованной всеми проводами от точки заземления и до выходного терминала (антенны) помещалось нечётное количество четвертей длины волны, соответствующей частоте колебаний в катушке;
- усиление мощности прямо пропорционально индуктивности и частоте, и обратно пропорционально сопротивлению вторичной системы;
- ударные импульсы, получаемые при разряде конденсатора, не являются обязательным условием, «может использоваться динамо-машина переменного тока подходящей конструкции, для накачки первички А». Добавим к сему – «или генератор синусоидальных колебаний», коих во времена Теслы просто не было. Другими словами, просто качера должно быть достаточно;
- спиральная форма катушки «обеспечивает нужный эффект», но не является обязательным условием. Сам Тесла в Колорадо-Спрингс работал с цилиндрическими катушками. Для катушки «очень важно, чтобы ее индуктивная связь с первичкой А не была очень сильной». Это и есть «нужный эффект»;

- очень полезно при работе помнить фразу: «При тщательном выполнении этих настроек и соотношений **и строгом соблюдении других конструктивных особенностей**,», - то есть, нужно быть готовым, при необходимости, эти «другие конструктивные особенности» додумать самому.

I will briefly summarise the above thought:

- It is necessary that the oscillations of the coil itself are in resonance with the oscillations in the [inductor / induction coil], and that there is an odd number of the quarter lengths of the wave, matching the oscillation frequency in the coil in the chain, formed by all the wires from the the ground point and to the output terminal (antenna);
- The power amplification is directly proportional to the inductance and frequency, and inversely proportional to the resistance of the secondary system;
- The shock pulses, obtained when the capacitor discharges, are not a prerequisite, “an alternating dynamo of suitable construction may be used to energize the primary A”. I will add – “or a [sine-wave generator / sine-wave oscillator], which simply didn’t exist in Tesla’s day. In other words, the kacher itself should be enough;
- The spiral form of the coil “secures this advantage”, but is not a required condition. Tesla himself worked with cylindrical coils in Colorado-Springs. For the coil “it is essential that its inductive connection with the primary A should not be very intimate”. This is the [“advantage” / desired effect];
- It is very useful, when working, to remember the phrase: “these adjustments and relations being carefully completed **and other constructive features indicated rigorously observed**,” - that is, you have to be ready, if necessary, to figure out these “other constructive features” yourself.

2. Объект исследования – катушка 1 с эмалированным проводом.

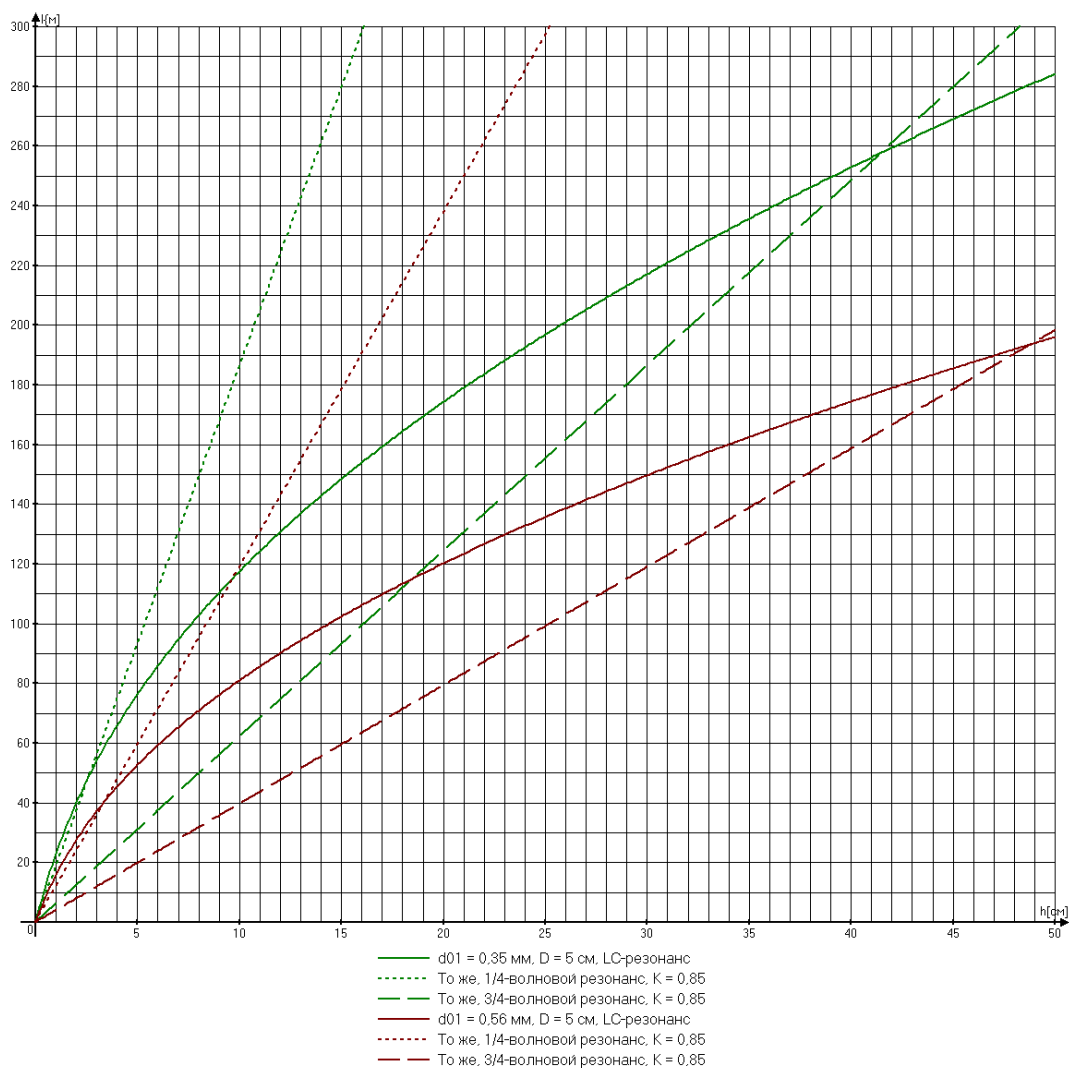
Во второй части вышеупомянутой работы построены графики, позволяющие, для некоторых проводов и диаметров каркаса, определить конфигурацию катушки, у которой в проводе умещается $\frac{1}{4}$ или $\frac{3}{4}$ длины волны колебаний контура. Мне выбирать не пришлось. Из проводов у меня в достаточном количестве только ПЭТ- 1 5 5 диаметром по меди 0,56 мм, а из каркасов – канализационная труба диаметром 50 мм.

Повторим здесь на рисунке 1 график для эмалированных проводов и каркаса диаметром 50 мм.

2. The object of the research – coil 1 with an enamel-covered wire.

In the second part of the document mentioned above we plotted some graphs, which enabled us, for certain wires and diameters of the frame, to determine the configuration of the coil, in the wire of which are fitted in either $\frac{1}{4}$ or $\frac{3}{4}$ wavelengths of the circuit oscillations. I did not have a choice. I only have enough wires of model ПЭТ- 1 5 5 with a 0.56 mm copper diameter, and in regards to frames – a 50 mm diameter drain pipe.

Let’s repeat here in Figure 1 the graph for enamel-covered wires and a 50 mm diameter frame.



- $d_{01} = 0.35 \text{ mm}, D = 5 \text{ cm. LC-resonance}$
- ⋯ The same. $\frac{1}{4}$ -wave resonance. $K = 0.85$
- - - The same. $\frac{3}{4}$ -wave resonance. $K = 0.85$
- $d_{01} = 0.56 \text{ mm}, D = 5 \text{ cm. LC-resonance}$
- ⋯ The same. $\frac{1}{4}$ -wave resonance. $K = 0.85$
- - - The same. $\frac{3}{4}$ -wave resonance. $K = 0.85$

Рис. 1. Графики зависимости длины волны с частотой LC-резонанса, $\frac{1}{4}$ -волнового и $\frac{3}{4}$ -волнового резонансов от длины намотки, для проводов в эмаливой изоляции, с диаметрами по меди 0,35 мм и 0,56 мм, намотанных на трубе диаметром 50 мм.

Проводу диаметром 0,56 мм соответствуют графики коричневого цвета.

Катушку с совмещённым $\frac{1}{4}$ -волновым резонансом мы уже попробовали. Качер на ней не запускается из-за большой частоты резонанса. Осталось попробовать катушку, у которой совмещён $\frac{3}{4}$ -волновой резонанс, тем более, что такая катушка имеет большую индуктивность и лучше отвечает предъявляемым к ней требованиям.

Из графика следует, что длина катушки должна быть 49 см. Но, из-за невысокой

точности графиков, следует перестраховаться и намотать катушку ещё длиннее. Во-первых, укорачивать проще, чем перематывать, во-вторых, предпочтительнее подстроить катушку внесением дополнительной ёмкости, например, при помощи заземлённой пластины из медной фольги, потому, что тогда мы сможем скомпенсировать ёмкость окружающих предметов при изменении положения катушки простым перемещением фольги.

Fig. 1. The graph of the LC-resonance frequency wavelength, $\frac{1}{4}$ -wave and $\frac{3}{4}$ -wave resonances from the winding length, for wires in enamel insulation, with copper diameters 0.35 mm and 0.56 mm, wound on a 50 mm diameter pipe.

The brown line corresponds to the 0.56 mm diameter wire.

We have already tried the coil with a combined $\frac{1}{4}$ -wave resonance. We did not activate the kacher on it because of the high resonance frequency. What's left is to try the coil with a combined $\frac{3}{4}$ -wave resonance, especially as such a coil has a large inductance, and better meets the demands placed upon it.

From the graph we can see, that the length of the coil should be 49 cm. But, because of the low accuracy of the charts, it is better to wind an even longer coil. Firstly, it is easier to shorten it, than to re-wind and secondly, it is preferable to tune the coil by introducing extra capacitance, for example, with the help of a grounded copper foil plate, because in this case we will be able to offset the capacitance of surrounding objects when the position of the coil changes, with a simple movement of the foil.

2.1. После подклеивания к стандартному отрезку трубы в 50 см небольшого куска такой же трубы и намотки на всю полученную длину, получилась катушка с длиной намотки 63,6 см. Результаты измерений параметров этой катушки занесены в таблицу 1.

2.1. After glueing to the standard 50 cm length of the pipe another piece of the same type of pipe and the winding over the whole end length, we got a coil with the length of the winding 63.6 cm. The results of the measurements of the parameters for this coil are found in Table 1.

Таблица 1. Результаты измерений и расчётов параметров катушки 1.

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Величина параметра	Размерность	Формула	Примечание
1	2	3	4	5	6	7
Катушка 1 – 1006 витков проводом 0,56 мм на каркасе D = 5 см						
1	Диаметр каркаса	D	0,050	м	измерено	-
2	Длина намотки	h	0,634	м	измерено	-
3	Диаметр жилы	dж	0,00056	м	паспорт	-
4	Диаметр провода	d	0,00063	м	измерено	-
5	Количество витков	n	1006	-	$n = h / d$	-
6	Длина провода	l	160	м	$l = \pi * (D + d) * n$	-
7	Длина рез. волны	λ пр	640	м	$4 * l$	$\frac{1}{4}$ -волн. рез.
8	Длина рез. волны	λ 3пр	213,35	м	$4/3 * l$	$\frac{3}{4}$ -волн. рез.
9	Скорость света	c	299792458	м / с	постоянная	-
10	Частота $\frac{1}{4}$ - волн. рез.	f чрасч1	0,468	МГц	$c / \lambda \text{ пр} * k з$	$k з = 1$
11	Частота $\frac{3}{4}$ - волн. рез.	f 3 чрасч1	1,405	МГц	$3 * f \text{ чрасч1}$	$k з = 1$
12	Коэф. замедления	kз1	0,85	-	измерено в прошлом опыте	

13	Частота ¼-волн. рез.	f _{расч}	0,398	МГц	c / λ пр *kз1	kз = 0,85
14	Частота ¾-волн. рез.	f _{расч}	1,19	МГц	c / λ 3пр *kз1	kз = 0,85
15	Индуктивность	L	3,9	мГн	измерено	-
16	Сопротивление	R	11,6	Ом	измерено	-
Параметры катушки 1, рассчитанные по результатам измерений в работе.						
13	Частота LC-резон.	f _{LC}	0,96	МГц	измерено	макс. верх
13	Частота резонанса	f ₁	2,4	МГц	измерено	мин. 16 см вр
15	Частота 4/4-волн. рез.	F _{4чизм}	3,4	МГц	измерено	мин. серед.
16	Частота 2/4-волн. рез.	F _{2чизм}	1,9	МГц	измерено	макс. серед.
17	Частота ¼-волн. рез.	F _{чизм}	0,95	МГц	F _{чизм} = F _{2чизм} / 2	-
18	Коэф. замедления	kз	0,83	-	kз = f _{чизм} / f _{расч1}	изменился
19	Ёмкость при f _{чизм}	C _{чизм}	14,3	пФ	C _{чизм} = 1 / (4*π ² * f _{чизм} ² * L)	-
20	Добавочная ёмкость	C _{доб}	10,2	пФ	C _{доб} = C _{чизм} - C	-

Table 1. The results of measurements and calculations of parameters of coil 1.

№	Parameter name	Denotation	Parameter size	Unit of measurement	Formula	Notes
1	2	3	4	5	6	7
Coil 1 – 1006 turns with a 0.56 mm wire on frame D = 5 cm						
1	Frame diameter	D	0.050	m	Measured	-
2	Length of winding	h	0.634	m	Measured	-
3	Core diameter	dc	0.00056	m	Passport	-
4	Wire diameter	d	0.00063	m	Measured	-
5	Number of turns	n	1006	-	n = h / d	-
6	Length of wire	l	160	m	l = π*(D + d)*n	-
7	Wave resonance length	λ _{wr}	640	m	4*l	¼-wave resonance
8	Wave resonance length	λ _{3wr}	213.35	m	4/3*l	¾-wave resonance
9	Speed of light	c	299792458	m/sec	Constant	-
10	Frequency ¼-wave resonance	f _{calculated1}	0.468	MHz	c / λ _{wr} *kз	kз = 1
11	Frequency ¾-wave resonance	f _{3calculated1}	1.405	MHz	3 * f _{calculated1}	kз = 1
12	Deceleration rate	kз1	0.85	-	Measured in the last experiment	
13	Frequency ¼-wave resonance	f _{calculatedч}	0.398	MHz	c / λ _{wr} *kз1	kз = 0.85
14	Frequency ¾-wave resonance	f _{calculated}	1.19	MHz	c / λ _{3wr} *kз1	kз = 0.85
15	Inductance	L	3.9	mH	Measured	-
16	Resistance	R	11.6	Ohm	Measured	-
Parameters of coil 1, calculated from experiment measurements						
13	Frequency LC-resonance	f _{LC}	0.96	MHz	Measured	Upper maximum
13	Resonance frequency	f ₁	2.4	MHz	Measured	Min. 16 cm upper* see note
15	Frequency 4/4-wave resonance	F _{4measured}	3.4	MHz	Measured	Minimum average
16	Frequency 2/4-wave resonance	F _{2measured}	1.9	MHz	Measured	Maximum average
17	Frequency ¼-wave resonance	F _{чmeasured}	0.95	MHz	F _{measured} = F _{2measured} / 2	-
18	Deceleration rate	kз	0.83	-	kз = f _{measured} / f _{calculated1}	changed
19	Capacitance at f _{measured}	C _{чmeasured}	14.3	pF	C _{fmeasured} = 1 / (4*π ² * f _{measured} ² * L)	-
20	Additional	C _{additional}	10.2	pF	C _{additional} =	-

	capacitance				Cfmeasured - C	

* (Note:I think the original abbreviation may stand for upper here).

2.2. Повторим здесь процесс измерения параметров катушек.
Основная схема измерения резонансов катушки изображена на рисунке 2.

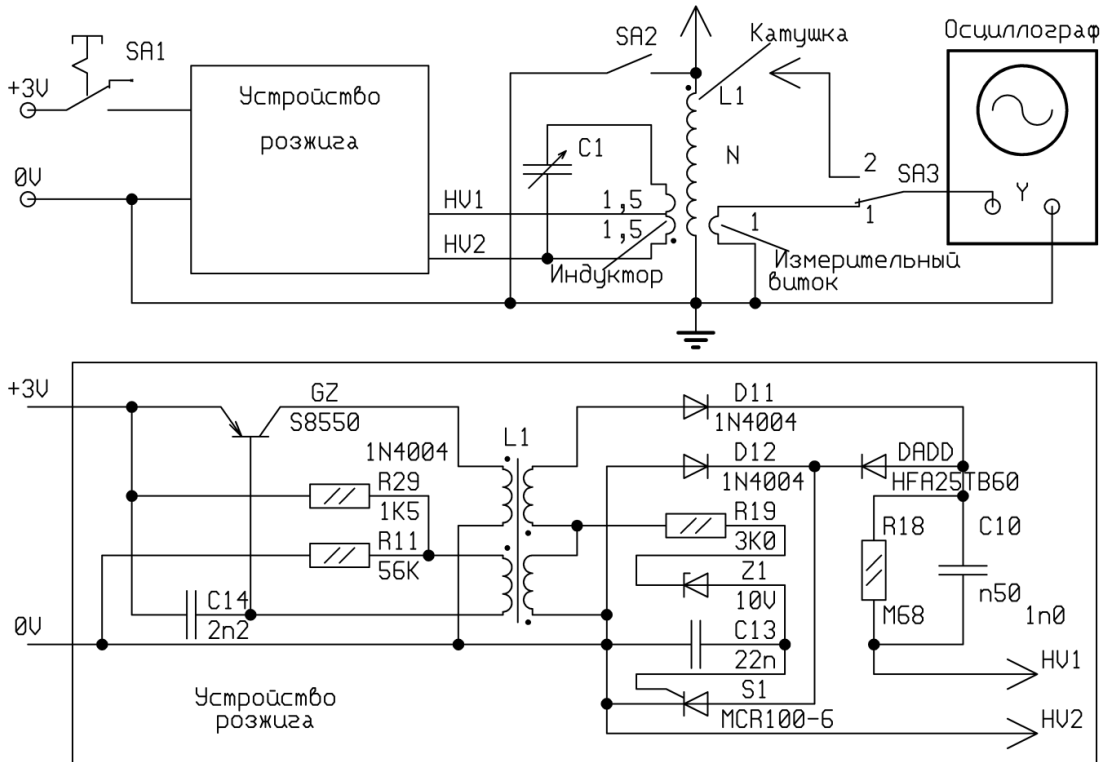


Рис. 2. Основная схема эксперимента.

2.2 Let's repeat here the process of measuring the parameters of the coils.
The main diagram of measuring the resonances of the coil can be seen in Figure 2.

Figure 2. The main diagram of the experiment.

Ignition device	[Inductor / induction coil]	Coil	Oscilloscope
Ignition device		Measuring coil	

Для возбуждения колебаний в катушке использовался блок розжига газовых водонагревателей, в котором удалена выходная катушка. Вместо неё используется тот же индуктор, что и в первой части статьи. Индуктор расположен под катушкой, на 5 см ниже первого витка катушки. Параллельно крайним выводам индуктора включён воздушный конденсатор С1 переменной ёмкости от старинного радиоприёмника («Казakhstan»). Таким образом, индуктор превращается в генератор с изменяемой частотой колебаний.

Измерительный виток намотан под первым витком катушки.

For the oscillation excitation in the coil, an ignition unit of a gas water heater has been used, with its output coil removed. Instead of it the same [inductor / induction coil] is used that we used in the first part of the experiment. The [inductor / induction coil] is located under the coil, 5 cm below the first turn of the coil. An air condenser C1 with a variable capacitance, taken from an ancient radio (“Kazakhstan”), is switched on in parallel to the outermost outputs of the [inductor / induction coil].

In this way, the [inductor / induction coil] becomes a [generator / alternator / dynamo] with a variable oscillation frequency.

The measurement coil is wound underneath the first turn of the coil.

2.2.1. Для определения частот, кратных $\frac{1}{4}$ -волновому резонансу в проводе, определим частоту полуволнового резонанса, а частоты, кратные $\frac{1}{4}$ -волновому резонансу, просто вычислим. Устанавливаем конденсатор С1 в положение минимальной ёмкости, замыкаем ключ SA2, то есть, свободный вывод катушки соединяем с землёй.

Подключаем осциллограф к измерительному витку - ключ SA3 в положении 1, и включаем питание (SA1).

В замкнутом с двух сторон проводе могут возникать стоячие волны только на частотах, кратных половине длины волны, то есть, резонансы $\frac{1}{2} = \frac{2}{4}$ -волновой, $\frac{2}{2} = \frac{4}{4}$ -волновой, и аналогичные.

Наблюдая сигнал на экране осциллографа, вращаем ручку конденсатора С1 и находим резонансы. Их оказалось много. Нас интересуют самые длинноволновые резонансы, после которых резонансов больше нет.

Последний резонанс оказался на частоте 1,9 МГц. Напряжённость поля вдоль катушки имеет минимумы по краям и максимум в середине. Предпоследний резонанс обнаружился на частоте 3,4 МГц. Минимумы напряжённости поля расположены по краям и в центре катушки. Вроде всё говорит о том, что мы наблюдаем полуволновой и волновой резонансы. То, что частоты этих резонансов не точно кратны 2, можно объяснить тем, что коэффициент замедления волны зависит от частоты сигнала. Не вяжется только расчётная частота $\frac{1}{4}$ -волнового резонанса, которая получается равной 0,95 МГц, в то время как ожидаемая частота должна находиться в районе 0,4 МГц. Сигнал в проводе не может распространяться со скоростью, превышающей скорость света. Настораживает и сильная чувствительность резонансной частоты к поднесению к катушке различных предметов. При резонансе в проводе может уменьшаться амплитуда сигнала, но частота резонанса изменяется слабо.

Объяснить этот феномен я смог только тем, что сопротивление катушки слишком велико для резонанса в проводе. А то, что мы наблюдаем, можно получить, если разделить катушку пополам и нарисовать два колебательных контура, соединённые между собой сопротивлением 11,6 Ом. То есть, катушка сама делится на две половины, каждая из которых резонирует на частоте, в два раза большей частоты

полного LC-контура. Желаящие могут посчитать, что так оно и будет. На частоте, в два раза большей, катушка делится на две пары контуров.

Забегая вперёд, скажу, что подтверждением этого служит измеренная резонансная частота, которая равна половине частоты последнего резонанса.

Итак, с измерением частоты $\frac{1}{4}$ -волнового резонанса потерпели неудачу.

2.2.1 To determine the frequencies which are multiples of the $\frac{1}{4}$ -wave resonance in the wire, let's determine the frequency of the half-wave resonance, and the frequencies, which are multiples of the $\frac{1}{4}$ -wave resonance, can simply be calculated. Place the capacitor C1 into the minimum capacitance position, [lock / short circuit] key SA2, that is, connect the loose output with the ground. Connect the oscilloscope to the measurement coil – key SA3 in position 1, and connect the power supply (SA1).

Standing waves can only appear at frequencies, which are multiples of half a wavelength, that is, resonances $\frac{1}{2} = 2/4$ -wave, $2/2 = 4/4$ -wave, and similar, in a wire which [has been closed at both ends / is a closed-loop].

Looking at the signal on the screen of the oscilloscope, turn the handle of the capacitor C1 and find the resonances. There turned out to be many. We are interested in the most longwave resonances, after which there are no more resonances.

The last resonance showed up at the 1.9 MHz frequency. The field strength along the coil has lows along the edges and the peak in the middle. The penultimate resonance showed up at the 3.4 MHz frequency. The lows of the field strength are located along the edges and in the centre of the coil. It looks like we are looking at halfwave and wave resonances. The fact that the frequencies of these resonances are not exact multiples of 2, can be explained by the fact that the deceleration rate is dependent on the frequency of the signal. The only thing which does not fit is the calculated frequency of the $\frac{1}{4}$ -wave resonance, which comes out equal to 0.95 MHz, whilst the expected frequency should be around 0.4 MHz.

The [signal / wave] in the wire cannot spread any faster than the speed of light. What is also alarming is the strong sensitivity of the resonance frequency to different objects being brought towards the coil. With resonance in the wire the signal amplitude can decrease, but the frequency of the resonance changes little.

I can only explain this phenomenon by the resistance of the coil being too high for the resonance in the wire. What we are observing can be obtained, if we split the coil in half and draw two oscillatory circuits, connected between themselves by a resistance of 11.6 ohm.

That is to say, the coil itself gets divided into two halves, each of which resonates at a frequency, twice the frequency of the full LC-circuit. Those interested can calculate, that this will indeed be the case. At a frequency, twice the size, the coil gets divided into two pairs of circuits.

Looking ahead, I will say, that the proof of this is the measured resonance frequency, which is equal to half of the frequency of the last resonance.

So, we have encountered a failure with regard to measuring the frequency of the $\frac{1}{4}$ -wave resonance.

2.2.2. Измерим теперь частоту LC-резонанса. Размыкаем ключ SA2 – освобождаем свободный конец катушки.

Наблюдая сигнал на экране осциллографа, вращаем ручку конденсатора C1 и опять находим самый низкочастотный резонанс на частоте 0,96 МГц. Это и есть LC-резонанс контура. Подтверждением служит тот факт, что при наблюдении LC- резонанса с

выхода одного витка, амплитуда сигнала очень маленькая. Зато чистый и большой сигнал наблюдается в положении 2 переключателя SA3, что на практике достигается поднесением щупа осциллографа к верхнему концу катушки, на расстояние не ближе 5 см.

На более высоких частотах тоже наблюдаются резонансы, причём, судя по большой амплитуде сигнала с одного витка, это резонансы в проводе, а судя по чувствительности к внешним предметам, это резонансы в контуре. Ближайший резонанс – на частоте 2,4 МГц. Интересно, что напряжённость поля вдоль катушки имеет минимум – полный ноль, на расстоянии ровно $\frac{1}{4}$ длины катушки от свободного конца, а частота в два раза выше расчётной частоты $\frac{3}{4}$ -волнового резонанса. Но это не чистый резонанс в проводе. Настройкой только индуктора не удаётся получить резонанс без биений. Биения можно устранить, поднося к катушке кусок заземлённой фольги, то есть, введением дополнительной ёмкости. Похоже, катушка опять сама делится на части таким образом, чтобы войти в резонанс. Но всё это не то, что мы ищем.

2.2.3. Отобразим полученные результаты на графиках.

На рисунке 3 представлены те же графики, по которым определялась длина намотки катушки, но с пометками ожидаемых длин волны и соответствующих им частот для намотанной катушки.

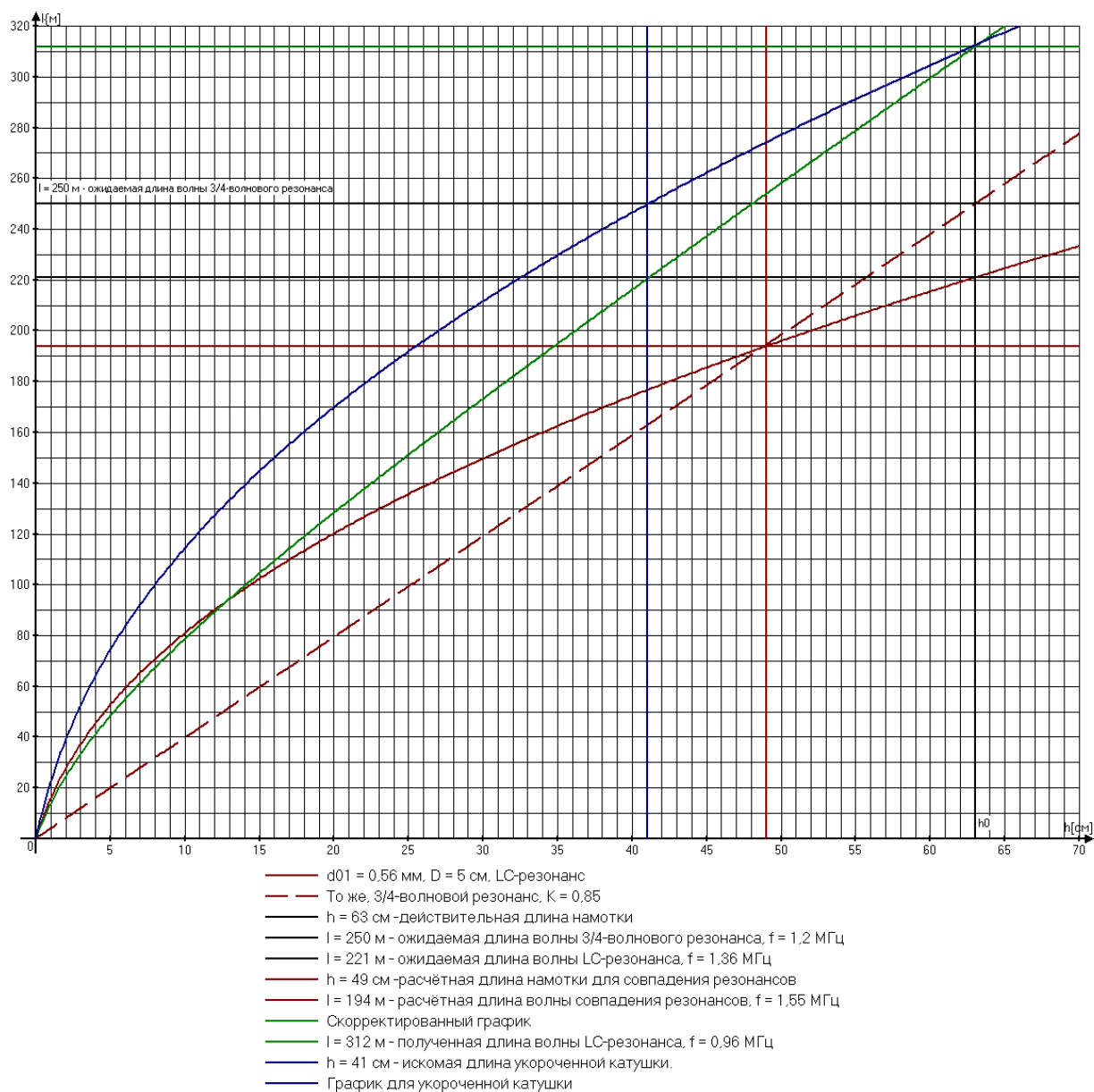
2.2.2 Now let's measure the LC-resonance frequency. Open the key SA2 – releasing the loose end of the coil.

Looking at the signal on the screen of the oscilloscope, turn the handle of the capacitor C1 and again find the most low frequency resonance at a frequency of 0.96 MHz. This is the circuit's LC-resonance. Confirming this is the fact that that when we watch the LC-resonance from the output of one turn, the amplitude of the signal is very small. But on the other hand a clear and big [signal / wave] can be seen in position 2 on the switch SA3, which in practice is achieved by bringing the oscilloscope probe to the upper end of the coil, at a distance not closer than 5 cm.

At higher frequencies resonances can also be observed, and besides, judging by the big signal amplitude from one turn, these are resonances from the wire, but judging from the sensitivity to external objects, these are resonances in the circuit. The closest resonance – at a frequency of 2.4 MHz. It is interesting, that the field strength along the coil is at a minimum – complete zero, at a distance exactly $\frac{1}{4}$ of the length of the coil from the loose end, and the frequency is twice as high as the calculated frequency of the $\frac{3}{4}$ -wave resonance. But this is not the pure resonance in the wire. By tuning only the [inductor / induction coil], we fail to get a resonance without the beats. The beats can be eliminated, by bringing a piece of grounded foil to the coil, that is, by introducing extra capacitance. It appears, that the coil is again dividing itself into parts in such a way, as to enter into resonance. But all of this is not what we are looking for.

2.2.3 Let's chart the obtained results on some graphs.

In Figure 3 are shown the same graphs, which were used to determine the winding length of the coil, but with marks of expected wavelengths and their corresponding frequencies for the wound coil.



- $d_{01} = 0.56 \text{ mm}$, $D = 5 \text{ cm}$. LC-resonance
- The same, $3/4$ -wave resonance. $K = 0.85$
- $h = 63 \text{ cm}$ – the actual length of the winding
- $l = 250 \text{ m}$ – the expected wavelength of $3/4$ -wave resonance. $f = 1.2 \text{ MHz}$
- $l = 221 \text{ m}$ – the expected wavelength of LC-resonance. $f = 1.36 \text{ MHz}$
- $h = 49 \text{ cm}$ – the calculated length of the winding for matching resonances
- $l = 194 \text{ m}$ – the calculated wavelength for matching resonances. $f = 1.55 \text{ MHz}$
- The corrected line
- $l = 312 \text{ m}$ – the obtained wavelength of LC-resonance. $f = 0.96 \text{ MHz}$
- $h = 41 \text{ cm}$ – the sought length of the shortened coil
- Line for the shortened coil

Рис. 3. Графики зависимости длины волны с частотой LC-резонанса, и $3/4$ -волнового

резонансов от длины намотки, для провода в эмаливой изоляции, с диаметрами по меди 0,56 мм, намотанного на трубе диаметром 50 мм.

Fig. 3. The graphs of the LC-resonance frequency wavelength, and $\frac{3}{4}$ -wave resonance from the winding length, for an enamel insulated wire, with a 0.56 mm copper diameter, wound on a 50 mm diameter pipe.

Результаты измерений содержат много загадок. Но если мы в них не разберёмся, большой труд окажется ненужным.

Первая неприятность – сопротивление катушки 11,6 Ом нельзя считать мизерным. Вторая – измеренная частота LC-резонанса 0,96 МГц оказалась гораздо ниже ожидаемой частоты 1,36 МГц. Рассчитанная собственная ёмкость 7,0 пФ оказалась в два раза больше ёмкости 3,49 пФ, использованной в формуле для построения графика. Если проанализировать предыдущие опыты, можно заметить, что собственная ёмкость наших больших катушек на самом деле не является величиной постоянной для заданных диаметра каркаса и провода (это вполне может быть справедливо для маленьких катушек), а возрастает с увеличением длины катушки. Логично предположить, что к межвитковой ёмкости добавляется ёмкость относительно окружающих предметов и земли. Она должна быть пропорциональна площади поверхности катушки и зависимость добавляемой ёмкости от длины намотки должна быть линейной. Зная длину намотки, при которой была получена исходная ёмкость $C_1 = 3,49$ пФ – при $h_1 = 0,1265$ м,

длину намотки изготовленной катушки и её ёмкость

$C_2 = 7,0$ пФ – при $h_2 = 0,634$ м,

определим для нашей катушки погонную добавляемую ёмкость

$$C_h = (C_2 - C_1) / (h_2 - h_1) = (7,0 - 3,49) / (0,634 - 0,1265) = 6,916 \text{ [пФ/м]} = 0,06916 \text{ пФ/см.}$$

Поскольку ранее вычисленная ёмкость C_0 сама содержит в себе погонную ёмкость, определим межвитковую ёмкость катушки.

$$C_W = C_1 - C_h * h_1 = 3,49 - 6,916 * 0,1265 = 2,62 \text{ [пФ]}.$$

Теперь мы можем скорректировать формулу, по которой строился график зависимости длины волны LC-резонанса от длины намотки катушки, подставив вместо C выражение $C = C_W + C_h * h$.

$$\begin{aligned} \lambda_{LC} &= c / f_{LC} = c * 2 * \pi * \sqrt{L * C} = \\ &= 299792458 * 2 * \pi * \sqrt{[10^{-6} * 0,01 * (D+d) * (h/d)^2 * (C_W + C_h * h) / (h / (D+d) + 0,44)]} = \\ &= 0,299792458 * 0,2 * \pi * (h / 0,063) * \sqrt{[5,063 * (2,62 + 0,06916 * h) / (h / 5,063 + 0,44)]} = \\ &= 6,728 * h * \sqrt{[(2,62 + 0,06916 * h) / (h / 5,063 + 0,44)]} \quad (1) \end{aligned}$$

Здесь $c = 299792458$ м/с - скорость света, d - диаметр провода с изоляцией, см, h - длина намотки, см, D – диаметр каркаса, см.

Вид формулы для программы AGrapher:

$$6.728 * x * \text{sqrt}((2.62 + 0.06916 * x) / (x / 5.063 + 0.44))$$

The results of the measurements contain many riddles. But unless we figure them out, a big job will turn out to have been unnecessary.

The first unpleasantness – the 11.6 ohm resistance of the coil cannot be considered inappreciable. The second – the measured frequency of LC-resonance, 0.96 MHz, turned out to be much lower than the expected frequency of 1.36 MHz. The calculated own capacitance 7.0 pF turned out to be twice the size of the capacitance of 3.49 pF, used in the formula for

plotting the graph.

If we analyse the previous experiments, we can notice, the the own capacitance of our big coils is actually not a constant value for the given diameters of the frame and the wire (this may well be the case for small coils), but increases with the increase in coil length. It is logical to assume, that to the winding capacitance is added the capacitance relative to the surrounding objects and the earth. It must be proportional to the coil surface area and the correlation between the added capacitance and the length of the winding must be linear.

Knowing the length of the winding, from which was obtained the initial capacitance

$C_1 = 3.49 \text{ pF}$ – when $h_1 = 0.1265 \text{ m}$,

The length of the winding of the made coil and its capacitance

$C_2 = 7.0 \text{ pF}$ – when $h_2 = 0.634 \text{ m}$,

we'll define for our coil the unit-length [additional / make-up] capacitance

$$C_h = (C_2 - C_1) / (h_2 - h_1) = (7.0 - 3.49) / (0.634 - 0.1265) = 6.916 \text{ [pF/m]} = 0.06916 \text{ pF/cm}.$$

Since the earlier calculated capacitance C_0 itself contains the unit-length capacitance, let's determine the winding capacitance of the coil.

$C_W = C_1 - C_h * h_1 = 3.49 - 6.916 * 0.1265 = 2.62 \text{ [pF]}.$

Now we can correct the formula, which was used to plot the graph of the correlation between the LC-resonance wavelength and the winding length of the coil, substituting instead of C the expression

$C = C_W + C_h * h.$

$$\begin{aligned} \lambda_{LC} &= c / f_{LC} = c * 2 * \pi * \sqrt{(L * C)} = \\ &= 299792458 * 2 * \pi * \sqrt{[10^{-6} * 0.01 * (D+d) * (h/d)^2 * (C_W + C_h * h) / (h / (D+d) + 0.44)]} = \\ &= 0.299792458 * 0.2 * \pi * (h / 0.063) * \sqrt{[5.063 * (2.62 + 0.06916 * h) / (h / 5.063 + 0.44)]} = \\ &= 6.728 * h * \sqrt{[(2.62 + 0.06916 * h) / (h / 5.063 + 0.44)]} \quad (1) \end{aligned}$$

(Note The formula in the above part had squares instead of π in the original, so I have inserted the π symbol back in – you may want to check that the π is in all the right places.)

Here $c = 299792458 \text{ m/sec}$ – speed of light, d – diameter of the insulated wire, cm, h – winding length, cm, D – frame diameter, cm.

Here is what the formula looks like for the programme AGrapher:

$6.728 * x * \text{sqrt}((2.62 + 0.06916 * x) / (x / 5.063 + 0.44))$

Скорректированный график нарисован на рисунке 2 зелёным цветом. Видно, что он никогда не пересекается с пунктирным графиком. То есть, совпадение $\frac{3}{4}$ -волнового резонанса с LC-резонансом в нашей конкретной катушке невозможно. Ранее я писал, что графики не отличаются точностью, но чтобы настолько – не предполагал. Можно было, конечно, и раньше намотать несколько катушек, измерить их индуктивность и построить более точный график, даже по точкам. Но боюсь, что тогда эта работа не была бы закончена никогда. А так мы всё же продвигаемся вперёд, корректируя процесс по результатам экспериментов.

Надеюсь, для более толстых проводов это не так фатально.

The corrected line of the graph is shown in Figure 2 in green. It is clear, that it never crosses the dotted line. That is to say, the matching of the $\frac{3}{4}$ -wave resonance with the LC-resonance in our particular coil is impossible. Earlier I wrote, that the graphs are not particularly accurate – but I never imagined it would be to such an extent. Of course, I could have wound a few coils earlier and measured their inductance in order to plot a more accurate chart, even

from point to point. But I'm afraid, that in that case the task would never have been complete. And this way we are still moving forwards, correcting the process according to the results of the experiments. I hope, that for thicker wires this is not as fatal.

3. Немного о «конструктивных особенностях».

Кажется, самое время сообразить некоторые «конструктивные особенности», чтобы с честью выйти из сложившейся ситуации: - затрачено много труда, уже почти у цели, и вдруг облом.

3.1. Наша задача – не укорачивая длины провода, укоротить катушку так, чтобы частота её LC-резонанса возросла до частоты $\frac{3}{4}$ -волнового резонанса.

3.1.1. Самый простой способ – сматывать с катушки нижнюю часть провода, соединённого с точкой заземления до тех пор, пока частота LC-резонанса не возрастет до частоты $\frac{3}{4}$ -волнового резонанса. Очевидно, с эмалированным проводом такой номер не пройдет, его слишком много, поэтому отложим этот вариант до работы с толстым проводом.

3.1.2. На второй способ намекает сам Тесла, когда пишет, что последовательно с катушкой может быть включён индуктор, или часть его.

3. A bit about “constructive features”.

It seems, now is the right time to consider some of the “constructive features”, in order to get out of this situation with honour: - we have carried out a lot of work, so nearly at the target, and suddenly a failure.

3.1 Our task – to shorten the coil in such a way, without shortening the length of the wire, so that its LC-resonance frequency increases up to the $\frac{3}{4}$ -wave resonance frequency.

3.1.1 The easiest method – to [reel off / wind off] the bottom part of the wire from the coil, connected to the grounding point, until the LC-resonance frequency goes up to the $\frac{3}{4}$ -wave resonance frequency. Evidently, this will not work with an enamel-covered wire, there is too much of it, and so we will leave this option until we start working with a thick wire.

3.1.2 Tesla himself hints at the second method when he writes, that [successively / in series] with the coil the [inductor / induction coil] can be switched on, or part thereof.

Частоту LC-резонанса можно увеличить, если смотать с катушки часть витков и намотать их на верхнюю часть катушки встречно. Получится укороченная катушка, к вершине которой соединена ещё одна катушка, не имеющая индуктивности, но вносящая дополнительную ёмкость в колебательный контур.

По зелёному графику легко определить, что длина такой катушки будет около 48 см. С учётом добавочной ёмкости, вносимой верхней катушкой, длина должна быть несколько меньше. Но лучше не гадать, а попробовать построить ещё один график и определить эту длину более точно.

Построим график зависимости частоты колебательного контура катушки, у которой длина провода фиксирована, катушка намотана на длину h , а остальной провод использован для намотки дополнительной катушки.

Экспериментально установлено, что ёмкость такой катушки такая же, как у исходной катушки.

Подставив в формулу (1) $0,06916 \cdot h_0$ вместо $0,06916 \cdot h$, получим выражение

для построения графика: $\lambda_{LC} = 6,728 \cdot h \cdot \sqrt{[(2,62 + 0,06916 \cdot h_0)/(h/5,063 + 0,44)]}$

=

$$= 6,728 \cdot h \cdot \sqrt{[(2,62 + 0,06916 \cdot 63,4)/(h/5,063 + 0,44)]} \quad (2)$$

Вид формулы для программы AGrapher:

$$6.728 * x * \text{sqrt}((2.62 + 0.06916 * 63.4) / (x / 5.063 + 0.44))$$

На рисунке 3 график для укороченной катушки изображён синим цветом. Проекция точки пересечения этого графика с горизонтальной линией, соответствующей частоте $3/4$ -волнового резонанса в проводе, на ось x показывает, до какой длины необходимо укоротить катушку, чтобы её LC-резонанс совпал с $3/4$ -волновым резонансом.

После укорачивания катушки до 39 см, её индуктивность уменьшилась с 3,9 мГн до 2,38 мГн, частота LC-резонанса действительно повысилась и стала равной 1,2 МГц, - практически такой же, как у $3/4$ -волнового резонанса 1,19 МГц. Тем не менее, выраженного резонанса в проводе обнаружить не удалось. Наблюдается некий намёк на резонанс в виде того, что немного увеличилась амплитуда сигнала с одного витка и при поднесении к катушке заземленного листа фольги наблюдаются очень слабые биения, которые не устраняются настройкой индуктора. То есть, похоже, всё-таки удалось совместить эти резонансы, но добротность явно не по Тесле.

The LC-resonance frequency can be increased, if some of the turns are unwound from the coil, and counter-wound on to the top part of the coil. You will get a shortened coil, to the top of which is attached another coil, which does not have any inductance, but brings an extra capacitance to the oscillatory circuit.

By the green line on the graph it is easy to determine, that the length of such a coil will be around 48 cm. Accounting for the extra capacitance, introduced by the upper coil, the length must be somewhat shorter. But it's better not to guess, but to plot another graph and to determine this length more precisely.

Let's plot the graph of the correlation between the coil's oscillatory circuit frequency, which has a fixed wire length; the coil is wound on to length h , and the rest of the wire is used in the winding of the additional coil.

By experimenting we established, that the capacitance of such a coil is the same as the original coil.

Substitute into formula (1) $0.06916 \cdot h_0$ instead of $0.06916 \cdot h$, we get the expression for plotting the graph: $\lambda_{LC} = 6.728 \cdot h \cdot \sqrt{[(2.62 + 0.06916 \cdot h_0) / (h / 5.063 + 0.44)]} = 6.728 \cdot h \cdot \sqrt{[(2.62 + 0.06916 \cdot 63.4) / (h / 5.063 + 0.44)]}$ (2)

This is what the formula looks like for the programme AGrapher:
 $6.728 \cdot x \cdot \text{sqrt}((2.62 + 0.06916 \cdot 63.4) / (x / 5.063 + 0.44))$

In Figure 3 the line for the shortened coil is shown in blue. The projection of the crossover point of this graph with the horizontal line, equivalent to the $\frac{3}{4}$ -wave resonance frequency in the wire, shows on the x-axis, to what length is necessary to shorten the coil, in order for its LC-resonance to match the $\frac{3}{4}$ -wave resonance.

After shortening the coil to 39 cm, its inductance decreased from 3.9 mH to 2.38 mH, the LC-resonance frequency really did get higher and became equal to 1.2 MHz, - nearly the same as the $\frac{3}{4}$ -wave resonance frequency, 1.19 MHz. Nevertheless, we did not manage to locate the expressed resonance in the wire. There was a hint of resonance in the form of a slightly increased signal amplitude from one turn, and when the grounded foil sheet was brought to the coil, some very faint beats could be observed, which did not go away by tuning the [inductor / induction coil]. That is, it looks like, that we still managed to match these resonances, but the quality factor is clearly not in the Tesla.

3.1.3. Можно подвести итоги по результатам эксперимента.

1. В очередной раз выяснилось, что тонкий провод для настоящей катушки Теслы непригоден.
2. Оказалось, что ранее полученные графики нуждаются в корректировке.
3. Уточнена формула для построения графиков зависимости индуктивности контура от длины намотки.
4. Предложено два и опробован один способ совмещения резонансов в случае, когда частота контурного резонанса ниже частоты резонанса в проводе.

4. Объект исследования – катушка 2 с проводом в ПВХ - изоляции.

Итак, мы опять убедились, что катушка Теслы должна быть «серьёзной». Рассмотрим внимательнее катушку, намотанную проводом сечением 2,5 мм² в ПВХ изоляции.

3.1.3 It is possible to summarise the results of the experiment.

1. Once again it was found, that a thin wire is not suitable for a real Tesla coil.
2. It was found, that the graphs which were previously charted require to be corrected.
3. The formula for plotting the graphs of the circuit inductance and the winding length was clarified.
4. Two methods were put forward, and one tried, for matching the resonances in the case when the circuit resonance frequency is lower than the wire resonance frequency.

4. The object of the experiment – coil 2 with a PVC-insulated wire.

So, we again confirmed, that the Tesla coil must be “serious”. Let’s look more closely at the coil, wound with a wire, cross-section 2.5 mm² in pvc insulation.

4.1. Ранее были исследованы две таких катушки разной длины. Полученной информации достаточно, чтобы скорректировать график зависимости LC-резонанса от длины намотки. При длине намотки, равной

$h_1=19,4$ см, собственная ёмкость катушки равна $C_1 = 4,19$ пФ,

а при длине намотки

$h_2 = 29,2$ см – $C_2 = 4,53$ пФ.

Отсюда погонная добавляемая ёмкость

$Ch = (C_2 - C_1)/(h_2 - h_1) = (4,53 - 4,19)/(29,2 - 19,4) = 0,0347$ [пФ/см].

Поскольку ёмкость C_1 сама содержит в себе погонную ёмкость, определим межвитковую ёмкость катушки.

$C_W = C_1 - C_h * h_1 = 4,19 - 0,0347 * 19,4 = 3,52$ [пФ].

Теперь мы можем скорректировать формулу (17) во второй части

вышеупомянутой статьи, по которой строился график зависимости длины волны LC-резонанса от длины намотки катушки, подставив вместо C выражение:

$C = C_W + C_h * h = 3,52 + 0,0347 * h$.

$\lambda_{LC} = c/f_{LC} = c * 2 * \pi * \sqrt{L * C} =$

$= 299792458 * 2 * \pi * \sqrt{[10^{-6} * 0,01 * (D+d) * (h/d)^2 * (C_W + C_h * h) / (h / (D+d) + 0,44)]} =$

$= 0,299792458 * 0,2 * \pi * (h/0,34) * \sqrt{[5,34 * (3,52 + 0,0347 * h) / (h/5,34 + 0,44)]} =$

$= 1,28 * h * \sqrt{[(3,52 + 0,0347 * h) / (h/5,34 + 0,44)]}$ (3)

Здесь $c = 299792458$ м/с - скорость света, d - диаметр провода с изоляцией, см, h - длина намотки, см, D - диаметр каркаса, см.

4.1 Earlier were tested two such coils of different lengths. There is enough retrieved information, in order to correct the graph of the correlation of the LC-resonance and the length of the winding.

When the length of the winding is equal

$h_1=19.4$ cm, the coil capacitance is equal to $C_1 = 4.19$ pF,

and with the length of the winding

$h_2 = 29.2$ cm – $C_2 = 4.53$ pF.

From this the unit-length [additional / make-up] capacitance

$Ch = (C_2 - C_1)/(h_2 - h_1) = (4.53 - 4.19)/(29.2 - 19.4) = 0.0347$ [pF/cm].

Since the capacitance C_1 itself contains the unit-length capacitance, the winding capacitance of the coil can be determined.

$C_W = C_1 - C_h * h_1 = 4.19 - 0.0347 * 19.4 = 3.52$ [pF].

Now we can correct formula (17) in the second part of the above-mentioned paper, which was used to chart the graph of the correlation of the LC-resonance wavelength and the winding length of the coil, substitute instead of C the expression:

$C = C_W + C_h * h = 3.52 + 0.0347 * h$.

$\lambda_{LC} = c/f_{LC} = c * 2 * \pi * \sqrt{L * C} =$

$= 299792458 * 2 * \pi * \sqrt{[10^{-6} * 0.01 * (D+d) * (h/d)^2 * (C_W + C_h * h) / (h / (D+d) + 0.44)]} =$

$= 0.299792458 * 0.2 * \pi * (h/0.34) * \sqrt{[5.34 * (3.52 + 0.0347 * h) / (h/5.34 + 0.44)]} =$

$= 1.28 * h * \sqrt{[(3.52 + 0.0347 * h) / (h/5.34 + 0.44)]}$ (3)

Here $c = 299792458$ m/sec – speed of light, d – insulated wire diameter, cm, h – winding length, cm, D – frame diameter, cm.

(Note: both the π and the $\sqrt{}$ are missing in the original document, you may want to check that I have inserted them in the right place in the above formula)

Вид формулы для программы AGrapher:

$1.28 * x * \text{sqrt}((3.52 + 0.0347 * x) / (x / 5.34 + 0.44))$

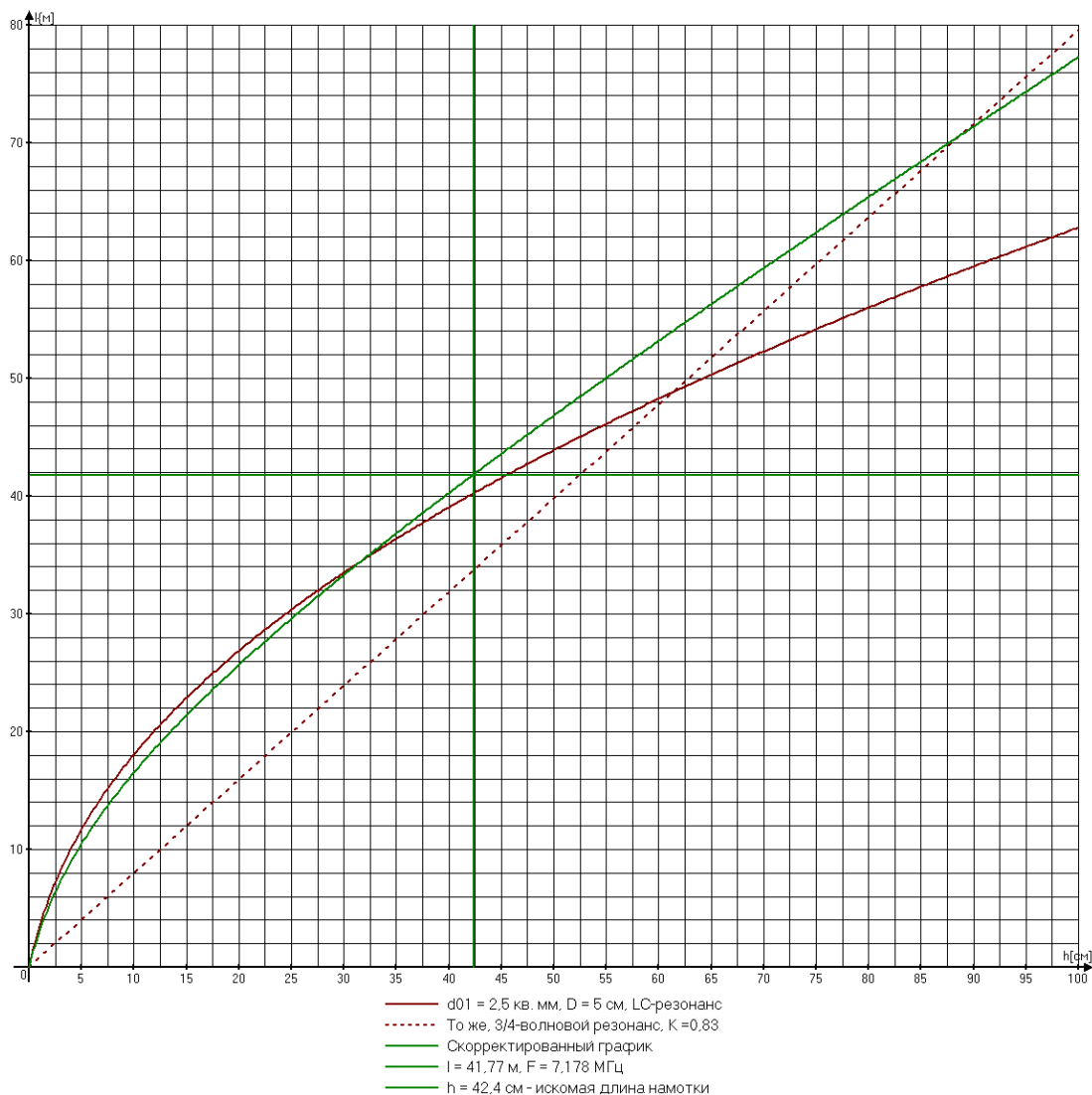
На рисунке 4 скорректированный график нарисован зелёным цветом. Видно, что скорректированный график LC-резонанса пересекается с графиком $\frac{3}{4}$ -волнового резонанса. Но длина катушки при этом получается около метра. Вряд ли длинная катушка является хорошим вариантом. Наверное, существует некоторое оптимальное отношение длины намотки к диаметру, которого мы пока не знаем.

This is what the formula looks like for the programme AGrapher:

$$1.28 * x * \sqrt{(3.52 + 0.0347 * x) / (x / 5.34 + 0.44)}$$

In Figure 4 the corrected line of the graph is shown in green.

It can be seen, that the corrected line of LC-resonance crosses with the $\frac{3}{4}$ -wave resonance line. But the length of the coil is herewith about a metre. It is unlikely that a long coil is a good option. There probably is some optimum relationship between the winding length to the diameter, which we do not yet know.



..... d01 = 2.5 mm², D = 5 cm. LC-resonance
 — The same. $\frac{3}{4}$ -wave resonance. K=0.83

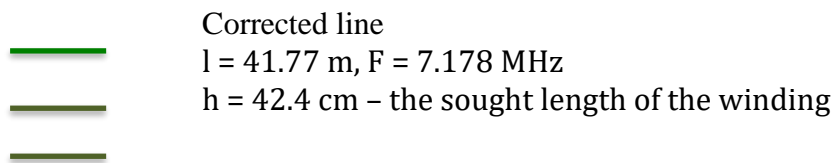


Рис. 4. Графики зависимости длины волны с частотой LC- и $\frac{3}{4}$ -волнового резонансов от длины намотки катушек, намотанных на трубе диаметром 50 мм, для провода в изоляции ПВХ, сечением $2,5 \text{ мм}^2$ диаметром 3,4 мм.

Fig. 4. The graph of the LC- frequency wavelength and $\frac{3}{4}$ -wave resonances from the coils' winding length, wound on a 50 mm diameter pipe, for a pvc-insulated wire, cross-section 2.5 mm^2 with a 3.4 mm diameter.

4.2. Применим к наматываемой катушке «конструктивную особенность», сформулированную в п. 3.1.1., то есть, наматываем на катушку не весь провод, а только часть его. Остальной провод будет располагаться свободно, от точки заземления до начала катушки.

Попробуем по графику на рисунке 4 хотя бы приблизительно оценить, сколько провода оставить свободным.

У нас в наличии имеется 26 м провода сечением $2,5 \text{ мм}^2$, в ПВХ изоляции, с диаметром жилы 1,8 мм и диаметром в изоляции 3,4 мм.

Для начала вычислим ожидаемую частоту $\frac{3}{4}$ -волнового резонанса. То есть, начнём работу с построения очередной таблицы.

Результаты измерений параметров этой катушки занесены в таблицу 2.

4.2 Let's apply to the coil being wound the "constructive feature", formulated in point 3.1.1., i.e., we will wind only a part of the wire on to the coil, and not the whole thing. The remaining wire will be loose, from the grounding point up to the beginning of the coil. Let's try, judging by the graph in Figure 4 to at least approximately estimate, how much wire to leave loose.

We have 26 m wires with a 2.5 mm^2 cross-section, pvc-isolated, with the core diameter of 1.8 mm and the insulated diameter of 3.4 mm.

To start with we will calculate the expected $\frac{3}{4}$ -wave resonance frequency. i.e., we will start by constructing another table.

The results of the changes of the parameters of this coil are found in Table 2.

Таблица 2. Результаты измерений и расчётов параметров катушки 2.

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Величина параметра	Размерность	Формула	Примечание
1	2	3	4	5	6	7
Катушка 2 – витков проводом $2,5 \text{ мм}^2$ на каркасе $D = 5 \text{ см}$						
1	Диаметр каркаса	D	0,050	М	Измерено	-
2	Диаметр жилы	$d_{\text{ж}}$	0,0018	М	Измерено	-
4	Диаметр провода	d	0,0034	М	Измерено	-
5	Длина провода	$l_{\text{пр}}$	26	М	Измерено	-

6	Коэф. Замедления	k_3	0,83	-	измерено в прошлом опыте	
7	Длина рез. волны $\frac{1}{4}$	$\lambda_{1пр}$	125,3	М	$\lambda_{1пр} = 4 * l_{пр} / k_3$	$\frac{1}{4}$ -волн. рез.
8	Длина рез. волны $\frac{3}{4}$	$\lambda_{3пр}$	41,77	М	$\lambda_{3пр} = \lambda_{1пр} / 3$	$\frac{3}{4}$ -волн. рез.
9	Скорость света	c	299792458	м / с	Постоянная	-
10	Частота $\frac{1}{4}$ -волн. рез.	$F_{чрасч}$	2,883	МГц	$F_{расч1} = c / (4 * l_{пр})$	$k_3 = 1$
11	Частота $\frac{1}{4}$ -волн. рез.	$F_{1чрасч}$	2,393	МГц	$F_{1расч} = c / \lambda_{1пр}$	$k_3 = 0,83$
12	Частота $\frac{3}{4}$ -волн. рез.	$F_{3чрасч}$	7,178	МГц	$F_{3расч} = 3 * F_{1расч}$	$k_3 = 0,83$
13	Длина намотки	h	0,424	М	из графика	-
14	Количество витков	n	125	-	$n = h / d$	-
15	Длина провода в кат.	$l_{кат}$	21	М	$l_{кат} = \pi * (D + d) * n$	-
16	Длина заземления	$l_{зем}$	5	М	$l_{зем} = l_{пр} - l_{кат}$	-
17	Индуктивность	L	87	мкГн	Измерено	-
Параметры катушки 2, рассчитанные по результатам измерений в работе.						
18	Частота LC-резон.	f_{LC}	6,7	МГц	Измерено	-
19	Собствен. Ёмкость	C	6,5	пФ	$C = 1 / (4 * \pi^2 * f_{LC}^2 * L)$	-
20	Частота $\frac{4}{4}$ -волн. рез.	$F_{4чизм}$	10,2	МГц	Измерено	-
21	Частота $\frac{1}{4}$ -волн. рез.	$F_{чизм}$	2,55	МГц	$F_{чизм} = F_{4чизм} / 4$	-
22	Частота $\frac{3}{4}$ -волн. рез.	$F_{3чизм}$	7,65	МГц	$F_{чизм} = F_{2чизм} * 3$	Ожидаема
23	Частота $\frac{3}{4}$ -волн. рез.	$F_{3чсовп}$	6,7	МГц	Измерено	-
24	Частота $\frac{1}{4}$ -волн. рез.	$F_{чсовп}$	2,23	МГц	$F_{чсовп} = F_{3чсовп} / 3$	-
25	Коэф. Замедления	k_3	0,77	-	$k_3 = F_{чсовп} / F_{чрасч}$	Изменился

Table 2. The results of the measurements and the calculations of the parameters for coil 2.

№	Parameter name	Disposition	Parameter size	Unit of measurment	Formula	Notes
1	2	3	4	5	6	7
Coil 2 – wire turns 2.5 mm ² on frame D = 5 cm						
1	Frame diameter	D	0.050	M	Measured	-
2	Core diameter	d _c	0.0018	M	Measured	-
4	Wire diameter	d	0.0034	M	Measured	-
5	Wire length	l_{wr}	26	M	Measured	-
6	Decelaration rate	k_3	0.83	-	Measured in previous experiment	-
7	Length of res. wave $\frac{1}{4}$	λ_{1wr}	125.3	M	$\lambda_{1wr} = 4 * l_{wr} / k_3$	$\frac{1}{4}$ -wave res.
8	Length of res. wave $\frac{3}{4}$	λ_{3wr}	41.77	M	$\lambda_{3wr} = \lambda_{1wr} / 3$	$\frac{3}{4}$ -wave res.
9	Speed of light	c	299792458	m / sec	Constant	-
10	$\frac{1}{4}$ -wave res. freq.	F_{calc}	2.883	MHz	$F_{calc1} = c / (4 * l_{wr})$	$k_3 = 1$
11	$\frac{1}{4}$ -wave res. freq.	F_{1calc}	2.393	MHz	$F_{1calc} = c / \lambda_{1wr}$	$k_3 = 0.83$
12	$\frac{3}{4}$ -wave res. freq.	F_{3calc}	7.178	MHz	$F_{3calc} = 3 * F_{1calc}$	$k_3 = 0.83$
13	Length of winding	H	0.424	M	From graph	-
14	Number of turns	N	125	-	$n = h / d$	-
15	Wire length in coil	l_{coil}	21	M	$l_{coil} = \pi * (D + d) * n$	-
16	Length of grounding	l_{grd}	5	M	$l_{grd} = l_{wr} - l_{coil}$	-
17	Inductance	L	87	uH	Measured	-

Parameters of coil 2, calculated by the results of the measurements during the tests						
18	LC-resonance freq.	f_{LC}	6.7	MHz	Measured	-
19	Own capacitance	C	6.5	pF	$C = 1 / (4\pi^2 * f_{LC}^2 * L)$	-
20	$1/4$ -wave res. freq.	F_{4msrd}	10.2	MHz	Measured	-
21	$1/4$ -wave res. freq.	F_{msrd}	2.55	MHz	$F_{msrd} = F_{4msrd} / 4$	-
22	$3/4$ -wave res. freq.	F_{3msrd}	7.65	MHz	$F_{msrd} = F_{2msrd} * 3$	Expected
23	$3/4$ -wave res. freq.	F_{3match}	6.7	MHz	Measured	-
24	$1/4$ -wave res. freq.	F_{match}	2.23	MHz	$F_{match} = F_{3match} / 3$	-
25	Decelaration rate	K_3	0.77	-	$k_3 = F_{match} / F_{calc}$	Changed

Расчётная частота $3/4$ -волнового резонанса в проводе получилась равной 7,178 МГц, что соответствует длине волны $\lambda_{3пр} = 41,77$ м. Проводим на графике горизонтальную линию, соответствующую длине волны 41,77 м. Через точку пересечения этой линии со скорректированным графиком LC-резонанса проводим вертикальную линию и на горизонтальной оси смотрим, какой длины должна быть катушка. Оказалось, порядка 42,4 см. Рассчитываем длину провода, которая уйдёт на намотку катушки, и видим, что провода хватает, свободным остаётся кусок длиной 5 м. Наматываем катушку длиной 43 см, свободный конец складываем вдвое и сматываем в бухту, чтобы не вносил искажений в измерения.

The calculated $1/4$ -wave resonance frequency in the wire came out equal to 7.178 MHz, which corresponds to the wavelength $\lambda_{3wr} = 41.77$ m. Let's draw a horizontal line on the graph at the point of the wavelength 41.77 m. At the point where this line crosses with the corrected LC-resonance line we draw a vertical line and look on the x-axis for the length which the coil should be. It turns out, around 42.4 cm. Calculate the wire length, which will be used to wind the coil and we can see, that there is enough wire, there will be a loose piece 5 m long.

Wind the coil, length 43 cm, fold the loose end in half and wind it into a coil, so that it does not distort the measurements.

4.3. Закорачиваем выводы катушки и соединяем их с заземлением.

Измеряем частоту полноволнового резонанса и рассчитываем ожидаемые частоты $1/4$ - и $3/4$ -волнового резонансов. Все результаты измерений занесены в таблицу 2.

4.4. Размыкаем выводы катушки и длинный вывод подключаем непосредственно к точке заземления. Варианты подключения к заземляющему проводу толстого сечения, или к заземлённому листу алюминия не проходят.

Полученная из скорректированного графика длина намотки оказалась настолько точной, что только небольшие биения в хвосте говорили о том, что оба резонанса имеют одну частоту. Подмотка трёх витков в катушке приводит к сильным биениям, которые не устраняются подстройкой индуктора. Полного совпадения удалось достигнуть, отмотав всего три витка.

Радует, что такой способ очень просто позволяет произвести подстройку. Просто вращая катушку, можно изменять в ней количество витков и наблюдать изменение сигнала на осциллографе.

Частота совпадения резонансов оказалась равной 6,7 МГц.

Частота $\frac{3}{4}$ -волнового резонанса оказалась ниже, чем измеренная по колебаниям в замкнутом проводе а результирующий коэффициент замедления в проводе оказался равным 0,77.

4.5. Наконец, удалось построить катушку, удовлетворяющую всем требованиям Николы Теслы, и совместить в ней $\frac{3}{4}$ -волновой LC- резонансы. Теперь надо разобраться с конструктивными особенностями индуктора.

4.3. Short-circuit the coil [terminals / leads] and connect them with the grounding. Measure the full-wave resonance frequency and calculate the expected $\frac{1}{4}$ -wave and $\frac{3}{4}$ -wave resonance frequencies. The results of all the measurements are found in Table 2.

4.4. Disconnect the coil terminals and connect the [long terminal / long lead] directly to the grounding point. The options of connecting a thick section to the ground wire, or to a grounded aluminium sheet, are not suitable.

The winding length we got from the corrected line on the graph turned out to be so exact, that only small beats in the [tail / tail-end] gave away that both resonances had the same frequency. Underwinding three turns in the coil led to strong beats, which were not possible to get rid of by tuning the [inductor / induction coil]. We managed to achieve [complete concurrence / an exact match] by unwinding just three turns. It pleases me, that such a method allows to make adjustments with great ease. By simply rotating the coil, it is possible to change the number of turns in it and observe the changing oscilloscope signal.

The matching resonances frequency turned out to be equal to 6.7 MHz.

$\frac{3}{4}$ -wave resonance frequency turned out to be lower, than the one measured by the oscillations in the shorted wire and the resulting deceleration rate in the wire turned out to be equal to 0.77.

4.5. Finally, we managed to build a coil, which met all of Nicola Tesla's requirements, and to match the $\frac{3}{4}$ -wave and LC-resonances in it.

Now we have to figure out the constructive features of the [inductor / induction coil].

5. Индуктор.

К сожалению, про индуктор известно очень мало – только то, что он должен иметь очень малое сопротивление, малую индуктивную связь с катушкой, и быть в резонансе с катушкой. Поэтому для экспериментов придётся изготавливать различные индукторы и находить их оптимальное расположение относительно катушки.

5.1. Рассмотрим, как влияет направление намотки витков и направление тока в индукторе, относительно витков в катушке, на выходной сигнал.

Индуктор изготовлен в форме плоской спирали из трёх витков, медной шиной 5x1,8 мм. Расположен в 5 см ниже первого витка катушки. Импульсный сигнал подаётся на вывод от середины индуктора относительно одного из его концов. Резонансный конденсатор подключён между концами индуктора.

Когда индуктор в резонансе с катушкой, переверот индуктора не оказывает влияния на амплитуду и форму сигнала.

Если убрать конденсатор, подключённый к индуктору для обеспечения резонанса, то от ударного импульса в катушке возникают колебания на её резонансной частоте.

Положение индуктора вместе с направлением импульса тока сильно влияет на форму сигнала.

Для определения направления намотки, за начало обмотки примем нижний конец катушки, соединённый с землёй, тогда результат различных манипуляций с положением индуктора и подключением к нему источника импульсов, можно описать следующим образом:

- Если на конец индуктора подавать отрицательный импульс относительно его начала, то на катушке наблюдается сигнал на её резонансной частоте и имеет вид затухающей синусоиды с минимальными искажениями.

- Если на конец индуктора подавать положительный импульс относительно его начала, то на катушке наблюдается сигнал на её резонансной частоте и имеет вид затухающей синусоиды с биениями, искажённый гармониками высших порядков. Начальная амплитуда сигнала несколько выше, чем в предыдущем случае.

Общее ощущение такое, что в первом случае у нас в системе имеется некая отрицательная обратная связь, а во втором случае – положительная.

Другими словами можно сформулировать, что в первом случае система ведёт себя так, как будто ток идёт «против потока», во втором случае – «в потоке».

В любом случае, это наблюдение подтверждает мысль, что в момент ударного импульса к земле должен быть приложен «минус», а к антенне – «плюс».

5. The Inductor (*Note: since the word inductor repeats a lot in this section, I will refer to it as inductor rather than as [inductor / induction coil]*)

Unfortunately, there is very little known about the inductor – only that it should have very little resistance, low inductive coupling with the coil, and be in resonance with the coil. For this reason we will have to make different inductors for our experiments and find their optimal positions in regard to the coil.

5.1 We will consider, what effect the winding direction of the turns and the direction of the current in the inductor, relative to the turns in the coil, has on the output signal.

The inductor is made in the shape of a flat spiral of three turns, a copper busbar 5 x 1.8 mm. The location is 5 cm below the first turn of the coil. The pulse signal is fed to the [output / terminal] from the middle of the inductor in relation to one of its ends. The resonant capacitor is connected between the ends of the inductor. When the inductor is in resonance with the coil, the [revolutions / turning] of the inductor will not affect the amplitude and the shape of the signal.

If the capacitor, connected to the inductor for the purpose of ensuring resonance, is removed, then oscillations arise at the coil's resonance frequency from the shock pulse in the coil. The position of the inductor along with the direction of the current pulse, strongly influence the shape of the signal.

In order to determine the direction of the winding, take as the beginning of the winding the lower end of the coil, connected with the ground; in that case the result of the various manipulations with the inductor and the connecting the source of the pulses to it, can be described in the following way:

- If a negative pulse is fed to the end of the inductor, relative to its beginning, then a signal can be observed on the coil (*note: it seems incorrect to say 'on' the coil, however, this is what it says in the original so I hope this makes sense to you. This goes for all the remaining uses of 'on' in a similar sense in the rest of the document*) at its resonant frequency and looks like a damped sinusoid with minimal distortions.
- If a positive pulse is fed to the end of the inductor, relative to its beginning, then a signal can be observed on the coil at its resonant frequency and looks like a damped sinusoid with beats, distorted by harmonics of the highest orders. The beginning signal amplitude is slightly higher, than in the preceeding case.

The general feeling is that in the first case there is some negative feedback in our system, and in the second case – positive.

In other words it can be said that in the first case the system behaves as if the current is going “against the current”, and in the second – “with the flow”.

In any case, this observation confirms the idea, that at the moment of the shock pulse, “[minus / negative]” should be attached to the earth, and the “[plus / positive]” to the antenna.

5.2. Определим оптимальные, форму и количество витков в индукторе.

По форме сравнивались спиральный и цилиндрический индукторы. Пока большого различия в их функционировании не обнаружилось, но цилиндрическая форма более компактна, поэтому далее пока будем работать с цилиндрическим индуктором.

От количества витков зависит скорость нарастания тока в индукторе в начальный момент, когда на него разряжается конденсатор, и добротность самого индуктора. Желательно найти компромисс.

Если слишком мало витков, - добротность самого индуктора падает из-за большой резонансной ёмкости. При увеличении количества витков добротность контура и, соответственно, амплитуда колебаний напряжения на индукторе сначала возрастает быстро, в разы, потом незначительно. Я остановился, по субъективным ощущениям, на границе быстрого и медленного возрастания добротности от количества витков. В результате получился цилиндрический индуктор диаметром 10 см, содержащий 6 витков, намотанных медной шиной 5x1,8 мм, с шагом 10мм.

5.2 Let's determine the optimum shape and number of turns in the inductor.

As for the shape, we compared a spiral and a cylindrical inductor. So far we have not found there to be a great difference in their functioning, but the cylindrical shape was more compact, and so we will continue working with the cylindrical inductor.

The speed of the current buildup in the inductor at the starting moment depends on the number of turns, when the capacitor discharges on to it, and the Q factor of the inductor itself. It is desirable to find a compromise.

If there are too few turns, - the Q factor of the inductor itself falls because of the high resonance capacitance. When the number of turns is increased the tuned-circuit Q factor and, respectively, the voltage oscillations amplitude on the inductor at first will increase quickly, by a number of times, and then insignificantly. I stopped, due to subjective feelings, on the border of fast and slow increase of the Q factor due to the number of turns. As a result I got a cylindrical inductor with a 10 cm diameter, containing 6 turns, wound in a copper busbar 5 x 1.8mm, with a 10 mm pitch.

5.3. Обнаружилось существенное влияние на процесс положения индуктора относительно катушки.

Когда верхний виток индуктора находится на расстоянии более 5 см (диаметр каркаса катушки) ниже, чем нижний виток катушки, ранее настроенный резонанс LC-контура и волны в проводе сохраняется, амплитуда сигнала на катушке изменяется только при удалении индуктора на расстояние более 10 см.

Если двигать индуктор к катушке, то при расстоянии, меньшем, чем 5 см, возникают биения, которые не устраняются настройкой индуктора. Частота LC- контура начинает понижаться. Причём, амплитуда колебаний в катушке сначала немного возрастает, потом остаётся неизменной, возможно, из-за возникающего расхождения резонансов. Вернуть совпадение резонансов можно, отматывая витки в катушке.

На рисунках 5 - 7 приводятся осциллограммы, показывающие зависимость амплитуды и формы сигнала от расстояния между катушкой и индуктором.

5.3 A significant influence was found in regard to the process of the location of the inductor in relation to the coil.

When the top turn of the inductor is located at a distance more than 5 cm (the diameter of the coil frame) lower, than the lowest turn of the coil, previously tuned LC-circuit and the wave in the wire resonance remains, the amplitude of the signal on the coil changes only when the inductor is moved to a distance further than 10 cm.

If we move the inductor towards the coil, then at a distance, smaller than 5 cm, beats appear, which do not go away by tuning the inductor. The LC- circuit frequency begins to lower. Besides, the oscillation amplitude in the coil at first slightly increases, then remains constant, possibly, because of the occurring resonances divergence. It is possible to match the resonances again by unwinding turns from the coil.

In Figures 5 – 7 are oscillograms, showing the correlation between the amplitude and the shape of the signal, and the distance between the coil and the inductor.

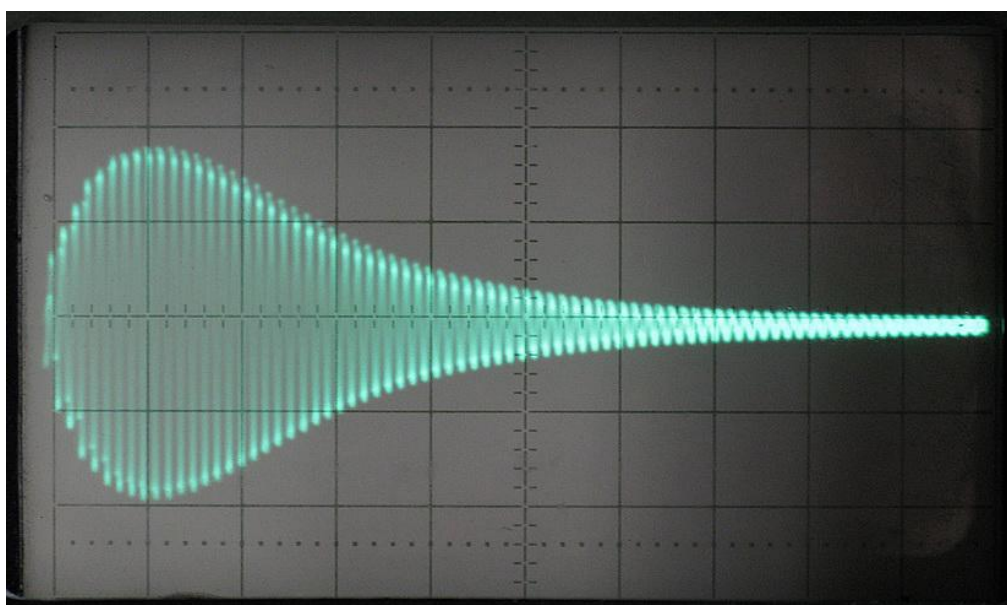


Рис. 5. Осциллограмма сигнала на катушке при расстоянии от индуктора до катушки 10 см. Установки: $X = 1$ мкс/дел, $Y = 0,2$ в/дел.

Fig. 5. Oscillogram of the signal on the coil at the distance of 10 cm from the inductor to the coil.

Settings: $X = 1$ microseconds/division, $Y = 0.2$ volt/division.

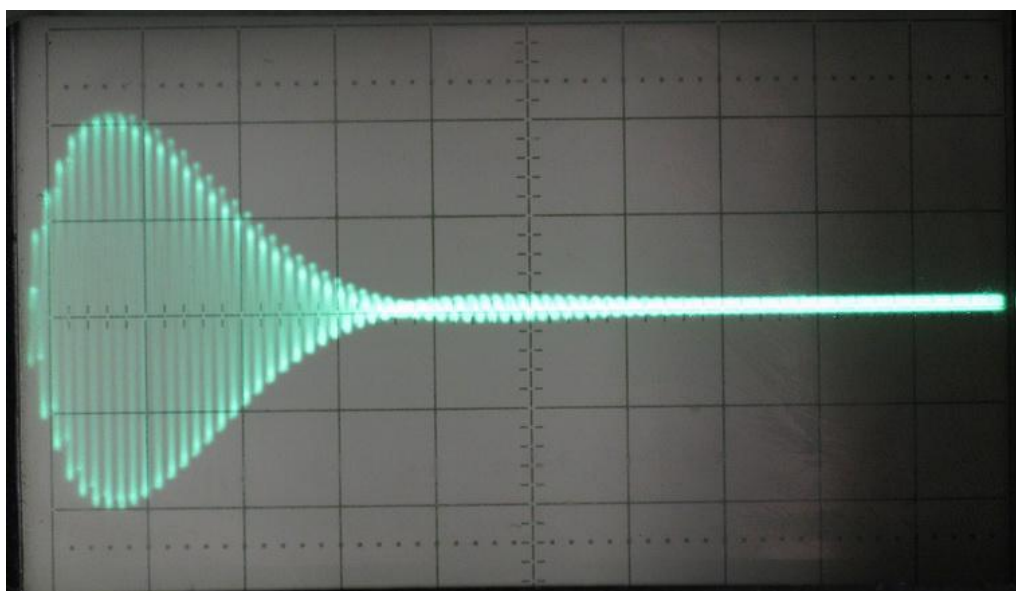


Рис. 6. Осциллограмма сигнала на катушке при расстоянии от индуктора до катушки 5 см. Установки: $X = 1$ мкс/дел, $Y = 0,2$ в/дел.

Fig. 6. Oscillogram of the signal on the coil at the distance of 5 cm from the inductor to the coil.

Settings: $X = 1$ microseconds/division, $Y = 0.2$ volt/division.

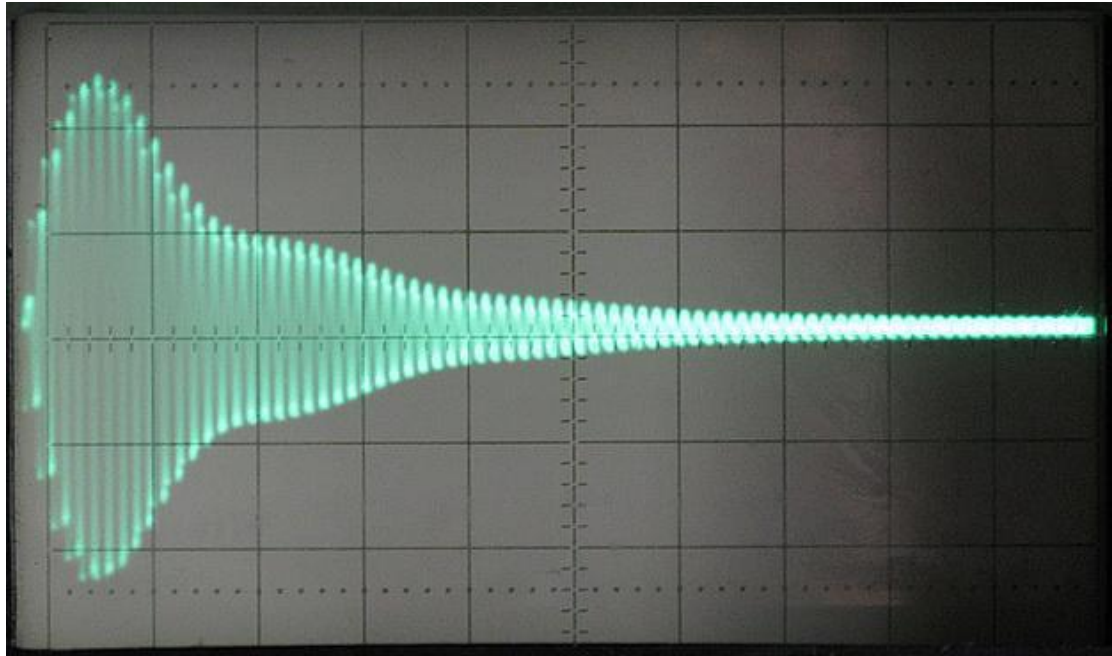


Рис. 7. Осциллограмма сигнала на катушке при расстоянии от индуктора до катушки 2 см. Установки: $X = 1$ мкс/дел, $Y = 0,2$ в/дел.

Fig. 7. Oscillogram of the signal on the coil at the distance of 2 cm from the inductor to the coil.

Settings: $X = 1$ microseconds/division, $Y = 0.2$ volt/division.

На рисунке 8 показано расположение щупа осциллографа при измерениях.

Figure 8 shows the location of the oscilloscope probe when taking measurements.



Рис. 8. Положение щупа осциллографа при снятии осциллограмм.

Figure 8. The location of the oscilloscope probe when taking oscillograms.

5.3.1. Очевидно, нас интересуют два случая: - когда катушка не попадает внутрь индуктора, и когда нижняя часть катушки полностью находится внутри индуктора. Поскольку на данный момент резонансы совмещены для первого случая, с него и начнём. Рассчитаем энергетический баланс. Исходные данные для расчётов и результаты сведены в таблицу 3.

5.3.1 It is apparent, that we are interested in two cases: - when the coil does not fall within the inductor, and when the lower part of the coil is fully located within the inductor. Because at the moment the resonances match in the first case, we will start with it.

Let's calculate the energy balance. The initial data for the calculations and the results are shown in Table 3.

Таблица 3. Энергетический баланс катушки 2.

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Величина параметра	Размерность	Формула	Примечание
1	2	3	4	5	6	7
Индуктор на 5 см ниже катушки, резонанс $\frac{3}{4}$ волны.						
1	Разрядная ёмкость	C_p	100	пФ	измерено	-
2	Амплитуда напряж.	U_p	400	В	измерено	-
3	Энергия разряда	E_p	$8 \cdot 10^{-6}$	Дж	$C_p \cdot U_p^2 / 2$	-
4	Ёмкость индуктора	$C_{\text{и}}$	130	пФ	измерено	-
5	Амплитуда напряж.	$U_{\text{и}}$	100	В	измерено	-
6	Энергия в индукторе	$E_{\text{и}}$	$0,65 \cdot 10^{-6}$	Дж	$C_{\text{и}} \cdot U_{\text{и}}^2 / 2$	-
7	Ёмкость катушки	$C_{\text{к}}$	6,5	пФ	Из табл. 2	-
8	Амплитуда напряж.	$U_{\text{к}}$	200	В	измерено	-

9	Энергия в катушке	E_k	$0,13 \cdot 10^{-6}$	Дж	$C_n \cdot U_n^2 / 2$	-
Индуктор над началом катушки, резонанс $\frac{1}{4}$ волны.						
10	Индуктивность	L	137	мкГн	измерено	-
11	Частота LC-резон.	f_{LC}	2,2	МГц	измерено	-
12	Собствен. ёмкость	C	38,2	пФ	$C = 1 / (4 \cdot \pi^2 \cdot f_{LC}^2 \cdot L)$	-
13	Амплитуда напряж.	U_k	200	В	измерено	-
14	Энергия в катушке	E_k	$0,76 \cdot 10^{-6}$	Дж	$C_n \cdot U_n^2 / 2$	-
15						
16						

Table 3. The energy balance of coil 2.

№ п/п	Parameter name	Disposition	Parameter size	Unit of measurement	Formula	Notes
1	2	3	4	5	6	7
The inductor [induction coil] is 5 cm lower than the coil, $\frac{3}{4}$ -wave resonance						
1	Discharge capacitance	C_r	100	pF	Measured	-
2	Voltage amplitude	U_r	400	V	Measured	-
3	Discharge energy	E_r	$8 \cdot 10^{-6}$	J	$C_r \cdot U_r^2 / 2$	-
4	Inductor capacitance	C_i	130	pF	Measured	-
5	Voltage amplitude	U_i	100	V	Measured	-
6	Energy in inductor	E_i	$0.65 \cdot 10^{-6}$	J	$C_i \cdot U_i^2 / 2$	-
7	Coil capacitance	C_c	6.5	pF	From Table 2	-
8	Voltage amplitude	U_c	200	V	Measured	-
9	Energy in coil	E_c	$0.13 \cdot 10^{-6}$	J	$C_i \cdot U_i^2 / 2$	-
The [inductor / induction coil] above the start of the coil, $\frac{1}{4}$ -wave resonance						
10	Inductance	L	137	uH	Measured	-
11	LC-resonance freq.	f_{LC}	2.2	MHz	Measured	-
12	Own capacitance	C	38.2	pF	$C = 1 / (4 \cdot \pi^2 \cdot f_{LC}^2 \cdot L)$	-
13	Voltage amplitude	U_c	200	V	Measured	-
14	Energy in coil	E_c	$0.76 \cdot 10^{-6}$	J	$C_i \cdot U_i^2 / 2$	-
15						
16						

Следует отметить, что при расположении индуктора ниже катушки, изменение ёмкости разрядного конденсатора (C10 на рисунке 2) в десять раз (от 50 пФ до 500 пФ), приводит к изменению амплитуды колебаний в катушке не более, чем в два раза. То есть, для возбуждения колебаний важен фронт, а не длительность импульса.

5.3.2. Разместим теперь индуктор над началом катушки и настроим резонанс. Разместили. Частота LC-контура понизилась, и сколько провода не отматывай, совместить резонанс LC-контура с $\frac{3}{4}$ -волновым резонансом в проводе не удаётся. Переделали цилиндрический

индуктор в спиральную катушку. Результат тот же. Задачу пришлось скорректировать. Раз частота LC-контура понижается, попытаемся понизить её ещё больше – до совпадения с $\frac{1}{4}$ -волновым резонансом в проводе. Для этого пришлось с обоих концов катушки смотать по 20 витков и намотать их в ту же сторону, но поверх уже намотанных витков. Внешний вид полученной катушки можно увидеть на рисунке 9.

It should be noted, that when the inductor is located lower than the coil, the change in capacitance of the energy discharge capacitor (C10 in Figure 2), is tenfold (from 50 pF to 500 pF), and leads to changes in the oscillation amplitude in the coil not greater, than twofold.

That is to say, it is the [front / forefront] that is important for the oscillation excitation, and not the pulse duration.

5.3.2 Now let's place the inductor above the beginning of the coil and tune the resonance. We've placed it there. The LC-circuit resonance has lowered, and regardless of how much wire was unwound, it was not possible to match the LC-circuit resonance with the $\frac{3}{4}$ -wave resonance in the wire. We changed the cylindrical inductor into a spiral coil. The same result. We had to re-formulate the task. Since the LC-circuit frequency decreases, we tried to lower it even further – until it matches the $\frac{1}{4}$ -wave resonance in the wire. To do this it was necessary to unwind 20 turns from both ends of the coil and to wind them in the same direction, but above the other turns. The resulting appearance of the coil can be seen in Figure 9.

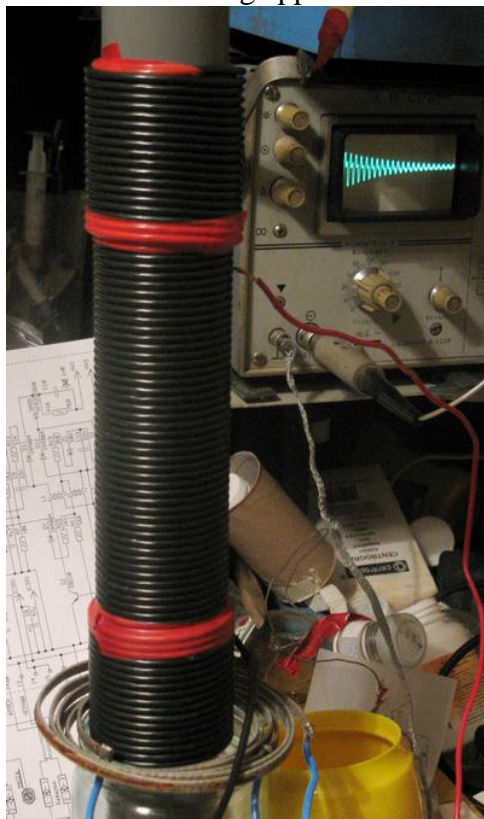


Рис. 9. Внешний вид катушки.

Figure 9. The appearance of the coil.

Индуктивность и собственная ёмкость катушки при такой намотке возросли, и частота понизилась. Окончательная доводка частоты LC-контура до совпадения с $\frac{1}{4}$ -волновым резонансом в проводе производилась перемещением заземлённой алюминиевой трубки с разрезом внутри каркаса с нижней стороны катушки. Частота $\frac{1}{4}$ -волнового резонанса оказалась равной 2,2 МГц, то есть, в три раза ниже частоты $\frac{3}{4}$ -волнового резонанса.

Катушка в таком виде стала сильно напоминать катушку Капанадзе из гринбокса. Теперь становится понятно, почему у Капанадзе катушка имеет такую конфигурацию. Так мы потихоньку сваливаемся от Теслы к Капанадзе. Для большего понимания механизма работы катушки Капанадзе, попытка подавать импульсы на разомкнутый индуктор относительно заземлённой трубки внутри каркаса увенчалась успехом. Потенциальным перепадом колебания возбуждаются почти так же, как током в индукторе. Для сравнения с положением индуктора вне катушки, рассчитаем энергетический баланс при той же разрядной ёмкости, что и в предыдущем случае. Результаты занесены в таблицу. Видно, что энергии в катушку передалось больше.

The inductance and coil capacitance increased with such a winding, and the frequency decreased. The final LC-circuit frequency tweaking until it matched the $\frac{1}{4}$ -wave resonance in the wire was done by moving the grounded aluminium tube with an incision inside the frame on the lower side of the coil. The $\frac{1}{4}$ -wave resonance frequency turned out to be equal to 2.2 MHz, i.e., three times lower than the $\frac{3}{4}$ -wave resonance.

The coil in this configuration began to closely resemble Kapanadze's Green Box coil. Now it becomes apparent, why Kapanadze's coil has this configuration. So we are slowly moving away from Tesla towards Kapanadze. For a greater understanding of the operating principle of Kapanadze's coil, an attempt to give [signals / pulses / momentum] to the disconnected inductor relative to the grounded tube inside the frame was successful. The potential [drop / difference] excites oscillations in almost the same way, as the current in the inductor.

For comparison with the position of the inductor outside of the coil, let's calculate the energy balance using the same discharge capacitance, as in the previous case. The results can be found in the Table. It can be seen, that more energy has been transferred to the coil.

5.3.3. Расположение индуктора над катушкой в корне отличается от расположения под катушкой. Отметим здесь выявленные отличия.

Во-первых, форма сигнала на выходе катушки приняла вид затухающей по экспоненте синусоиды, но импульсы одной полярности сворачиваются, как показано на рисунке 10. При изменении полярности задающих импульсов, сворачиваются импульсы противоположной полярности.

Во-вторых, амплитуда импульсов на выходе катушки почти пропорциональна ёмкости разрядного конденсатора. То есть, зависит не только от наличия фронта, но и от длительности возбуждающего импульса.

Перемещая спиральный индуктор вглубь катушки, можно найти оптимальное положение, при котором амплитуда выходного сигнала максимальна, но это положение недалеко от начала катушки.

5.3.3. The position of the inductor above the coil is fundamentally different from the position under the coil. We will note here the identified differences. Firstly, the signal waveform at the coil output became an exponential damping sinusoid, but the pulses of the same polarity contracted, as shown in Figure 10. When the polarities of the pilot pulses were changed, the pulses of the opposite polarity contracted. Secondly, the pulse height at the output of the coil was nearly proportional to the capacitance of the energy discharge capacitor. i.e., it depends not only on the presence of the [front / forefront], but also on the duration of the exciting pulse. By moving the spiral inductor deep into the coil, it was possible to find the optimum position, at which the amplitude of the output signal was at its maximum, but this position was not far from the beginning of the coil.

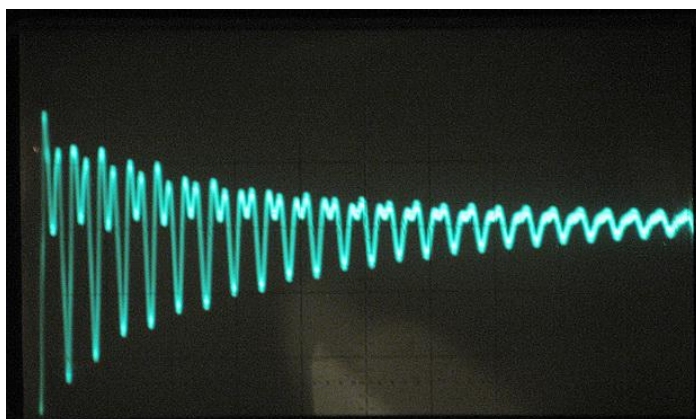


Рис. 10. Осциллограмма сигнала на катушке при расположении индуктора над началом катушки. Установки: $X = 1$ мкс/дел, $Y = 0,2$ в/дел.

Fig. 10. Oscillogram of the signal on the coil when the inductor is positioned above the beginning of the coil.

Settings: $X = 1$ microseconds/division, $Y = 0.2$ volt/division.

И, для общего сведения, на рисунке 11 приведена осциллограмма, полученная при возбуждении катушки потенциальным импульсом.

And, for general information, Figure 11 shows the oscillogram which was obtained when the coil was excited by the potential [pulse / surge / signal].

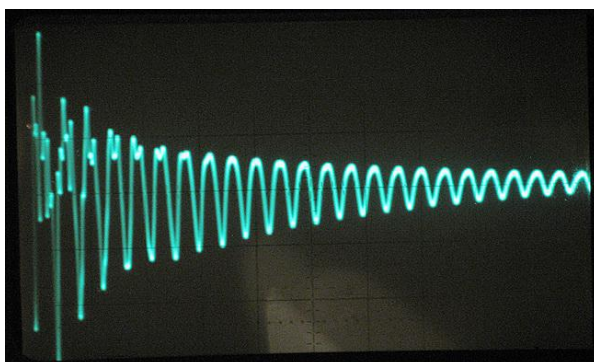


Рис. 11. Осциллограмма сигнала на катушке при расположении индуктора над началом катушки. Установки: $X = 1$ мкс/дел, $Y = 0,1$ в/дел.

Как видно из рисунка, его амплитуда всего в два раза меньше амплитуды импульса, возбуждаемого импульсом тока в индукторе. Обе осциллограммы сняты при ёмкости задающего конденсатора 100 пФ.

Fig. 11. Oscillogram of the signal on the coil when the inductor is positioned above the beginning of the coil.

Settings: $X = 1$ microseconds/division, $Y = 0.1$ volt/division.

As can be seen from the above figure, its amplitude is only twice the size of the amplitude of the pulse, excited by the current pulse in the inductor. Both oscillograms were taken when the capacitance of the master capacitor was 100 pF.

5.4. Итак, теперь мы знаем, что есть два принципиально различных расположения индуктора относительно катушки.

Первое – когда индуктор вынесен за пределы катушки на расстояние, большее диаметра каркаса. В этом случае энергия, передаваемая в катушку, зависит больше от частоты, чем от длительности импульсов накачки. Индуктор слабо влияет на LC-резонанс катушки. Возможны как $1/4$ -волновой, так и $3/4$ -волновой резонансы.

Второе – когда часть катушки расположена внутри индуктора. Энергия, передаваемая в катушку, зависит от частоты и от длительности импульсов накачки. Катушка имеет большую собственную ёмкость, LC-резонанс контура катушки при этом понижается. Система, настроенная в резонанс, более устойчива к внесённой внешними предметами ёмкости. Возможен $1/4$ -волновой резонанс, $3/4$ -волновой резонанс получить не удалось.

5.4 So, now we know, that there are two fundamentally different positions of the inductor in relation to the coil.

The first – when the inductor is taken outside of the coil to a distance greater than the diameter of the frame. In this case, the energy transmitted to the coil, depends more on the frequency, than on the pump pulse duration. The inductor has little effect on the LC-resonance of the coil. Both $1/4$ -wave and $3/4$ -wave resonances are possible. The second – when a part of the coil is positioned inside the inductor. The energy, transmitted to the coil, depends on the frequency and on the pump pulse duration. The coil has a greater capacitance, wherein the LC-resonance of the coil's circuit decreases. The system, tuned to resonance, is more stable to capacitance which is brought in by external objects. $1/4$ -wave resonance is possible, it was not possible to get a $3/4$ -wave resonance.

6. Точка заземления и цельность провода.

В опытах со второй катушкой использован цельный кусок провода от точки заземления и до конца намотки. Это неудобно. Хотелось бы проверить, можно ли этот провод обрывать в конце катушки, и наращивать таким же или другим проводом без ущерба для

совмещения резонансов.

6.1. Отрываем провод от точки заземления и присоединяем его к заземляющему проводу длиной 6 м и сечением 12 кв.мм.

Отключаем конденсатор от индуктора, параллельно катушке устанавливаем конденсатор переменной ёмкости, при увеличении ёмкости обнаруживаем биения и подстраиваем конденсатор до их пропадания.

Частота, при которой совпали резонансы, оказалась равной 1,8 МГц.

Проверяем. При длине провода 26 м частота $\frac{1}{4}$ -волнового резонанса была 2,2 МГц. При длине провода $26 + 6 = 32$ м, частота $\frac{1}{4}$ -волнового резонанса должна снизиться до величины $2,2 \cdot 26 / 32 = 1,79$ МГц, что в пределах точности измерения частоты осциллографом соответствует полученной частоте совпадения резонансов.

6.2. Других экспериментов можно не ставить.

Мы выяснили, что провод катушки можно наращивать для понижения частоты $\frac{1}{4}$ -волнового резонанса, и таким образом настраивать его на частоту LC-резонанса в контуре.

Кроме того, оказалось, что можно наращивать проводом большего сечения.

6. The ground point and the wholeness of the wire.

In experiments with a second coil a whole piece of wire was used from the ground point and to the end of the winding. This is inconvenient. It would be good to check, whether it would be possible to cut this wire short at the end of the coil, and lengthen using the same or a different wire without harming the matching of the resonances.

6.1 Tear away the wire from the ground point and connect it to the ground wire with a length of 6 m and cross-section of 12 mm².

Switch off the capacitor from the inductor, set up a variable capacitor in parallel to the coil, detect the beats which have been caused by an increase in capacitance, and tune the capacitor until they disappear.

The frequency, at which the resonances matched, turned out to be equal to 1.8 MHz.

Check it. When the length of the wire was 26 m the $\frac{1}{4}$ -wave resonance frequency was 2.2 MHz. When the length of the wire was $26 + 6 = 32$ m, the $\frac{1}{4}$ -wave resonance frequency should have decreased to the value of $2.2 \cdot 26 / 32 = 1.79$ MHz, which corresponds to the obtained frequency of matching resonances, within the accuracy of the measurement of the frequency by the oscilloscope.

6.2 We don't have to do any more experiments.

We found out, that it is possible to lengthen the coil wire in order to decrease the $\frac{1}{4}$ -wave resonance frequencies, and thus tune it to the LC-resonance frequency in the circuit.

Besides that, it turned out, that it is possible to lengthen using a wire with a big cross-section.

7. Поиски Свободной Энергии.

Кажется, мы достаточно хорошо научились обращаться с катушкой Теслы. Но «лишней» энергии пока не заметили. Возможно, не там искали. Надо уточнить задачу.

У Теслы задача состояла в том, чтобы как можно больше энергии отправить в окружающее пространство. А сколько её уходит в это самое пространство, мы как раз и не измеряли.

Наша задача, - наоборот, как можно меньше энергии отправить в окружающую среду, и как можно больше снять для личного пользования здесь и сейчас. Так что, на данном этапе необходимо сделать поворот в другую сторону.

Как-то само собой получилось, что катушка Теслы потихоньку приняла вид катушки Капанадзе, который успешно решил нашу задачу. Очевидно, всё приходит к тому, что далее надо заниматься катушкой Капанадзе.

7.1. Перематываем нашу катушку более компактно, как у Капанадзе в гринбоксе, фотографии которой приведены на рисунках 12 и 13.

В катушке просматривается ещё одна обмотка, намотанная под катушкой Теслы. Наматываем и эту катушку тоже. Пока просто один слой провода.

7. The search for Free Energy.

It seems, that we have learned to use the Tesla coil relatively well. But we have not yet observed any “excess” energy. It is possible, that we have not looked in the right place. It is necessary to re-formulate the task.

Tesla’s task was to send as much energy as possible into the surrounding space. And how much energy goes out into this very space, is exactly what we didn’t measure.

Our task, - on the contrary, was to send as little energy as possible into the surrounding space, in order to get as much as possible for our personal use in the here and now. So, at this stage, it is necessary to turn in another direction.

It somehow happened, that the Tesla coil gradually took on the appearance of the Kapanadze coil, which successfully solved our task. Evidently, all points to the fact that in the future we should work with the Kapanadze coil.

7.1 Let’s re-wind our coil in a more compact way, how Kapanadze does it in the Green Box, photos of which are shown in Figures 12 and 13.

One more winding can be seen in the coil, wound under the Tesla coil. We will wind this coil also. For now just one layer of wire.

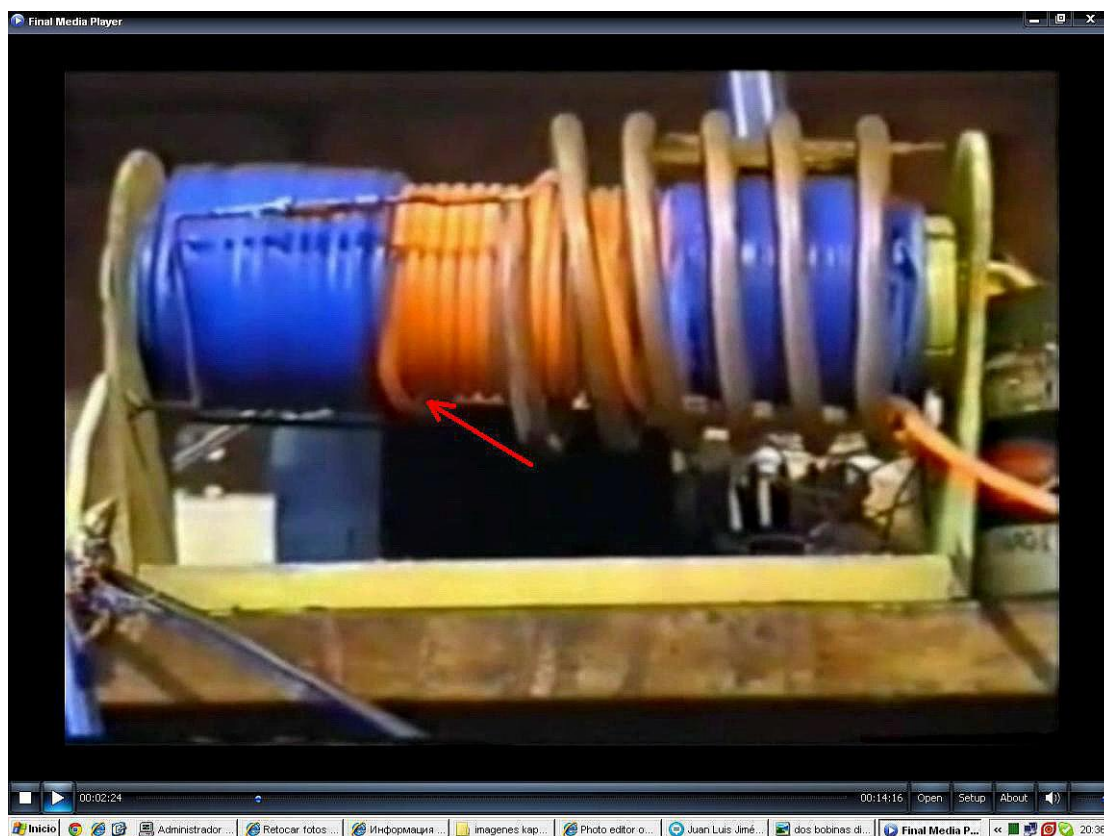


Рис. 12. Катушка Капанадзе.

Figure 12. Kapanadze Coil.

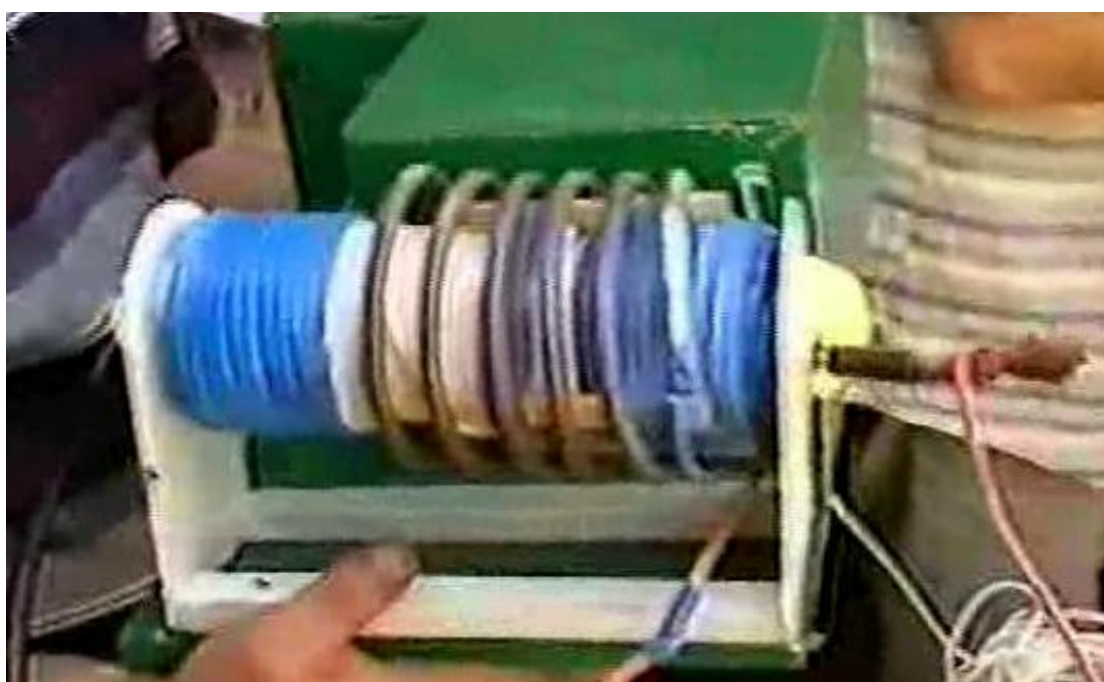


Рис. 13. Та же катушка в гринбоксе.

В результате получили катушку, показанную на рисунке 14.

Figure 13. The same coil in a green box.

As a result we got the coil, shown in Figure 14.



Рис. 14. Экспериментальная катушка.

От обмотки нижнего слоя отходит слева голубой провод, а справа чёрный, потому, что пришлось нарастить провод, как показано на рисунке 15.

Figure 14. The experimental coil.

There is a blue wire coming out from the bottom layer of the winding on the left, and a black one on the right, because we had to lengthen the wire, as shown in Figure 15.



Рис. 15. Нижний слой катушки с наращённым проводом.

Включение вновь намотанной катушки, как катушки Теслы, при свободных концах нижней обмотки, показало, что посредством вдвигания в трубу заземлённой дюралевой трубки удаётся совместить резонансы. То есть, катушка «работает».

Figure 15. The bottom layer of the coil with the lengthened wire.

Switching on the newly wound coil, with loose ends of the bottom winding, like the Tesla coil, showed that by pushing a grounded dural tube into the pipe it is possible to match the resonances. In other words, the coil “works.”

7.1.1. Попробуем теперь осмыслить катушку Капанадзе и попытаемся что-нибудь извлечь из нашей катушки.

Но сначала произведём эксперимент. В месте соединения нижнего вывода катушки Теслы с заземляющим проводом вставляем резистор сопротивлением 15 Ом, и смотрим осциллограмму. На резисторе наблюдаем напряжение с амплитудой 1,5 В. Это значит, что в заземляющем проводе протекает ток с амплитудой 0,1 А. Замыкание резистора никак не сказывается на осциллограмме напряжения на катушке. То есть, стоячая волна в проводе никак не реагирует на сопротивление, возможно, потому, что оно на порядок меньше волнового сопротивления провода. И ещё можно объяснить такое поведение тем, что процесс возбуждения волны (как было показано в ранних экспериментах, напряжением на свободном конце волновода), и процесс прохождения волной сопротивления нагрузки разнесены во времени, и явно не связаны.

Ещё один эксперимент. Включим катушку, как у Капанадзе в гринбоксе. Соединим провода, которые идут в жестяную банку, и подадим на них перепады напряжения 200 В через конденсатор 500 пФ. (Конденсатор медленно заряжается и разряжается на катушку через тиристор). В нагрузку тот же резистор 15 Ом.

По каждому импульсу в нагрузке наблюдаем гармонические затухающие колебания тока с начальной амплитудой 1 А.

7.2. Исследование катушки Капанадзе имеет смысл выделить в отдельную статью, а пока подведём итоги работы.

1. В реальных катушках Теслы возможно совмещение LC-резонанса с $\frac{1}{4}$ - и $\frac{3}{4}$ -волновым резонансом.
 2. На поведение катушки Теслы сильно сказывается расположение индуктора. Есть как минимум два в корне отличных положения – когда индуктор находится на расстоянии, большем диаметра намотки от катушки и когда индуктор расположен полностью над катушкой.
 3. Действительно, длину провода, при расчёте резонанса, необходимо отсчитывать от точки заземления.
 4. В заземляющем проводе течёт ток, который способен выделить в нагрузку некоторую мощность, не оказывая влияния на резонансные процессы в катушке. Пока это единственное, за что можно зацепиться в поисках СЕ.
- Всем удачи! =Multik из Мультикона.=

23.02.2012.

7.1.1 Now let's try to comprehend the Kapanadze coil and attempt to extract something from our coil.

But first we will do an experiment. Insert a resistor with a 15 ohm resistance at the place where the lower [terminal / output] of the Tesla coil meets the ground wire, and look at the oscillogram. We can observe on the resistor the voltage with a 1.5 V amplitude. This means, that a current with an amplitude of 0.1 A flows in the ground wire. Short circuiting the resistor does not affect the oscillogram of the voltage in the coil. I.e., the standing wave in the wire does not respond to the resistance, perhaps

because it is [by one order less / much less] than the wave resistance of the wire. And this behaviour can also be explained by the fact that the process of wave excitation (as was shown in previous experiments, with the voltage at the loose end of the waveguide), and the process of the wave passing the load resistance are separated in time, and are obviously not connected.

One more experiment. Let's turn on the coil, as in Kapanadze's Green Box. Connect the wires, which are going into a tin can, and feed the changes in voltage 200 V to them through the capacitor 500 pF. (The capacitor slowly charges and discharges on to the coil through a thyristor). The same 15 ohm resistor to the load.

We can observe damped harmonic current oscillations with an initial amplitude of 1 A with each pulse in the load.

7.2 It makes sense to write a separate article about the Kapanadze coil investigation, and for now we will summarise the results of our work.

1. It is possible to match the LC-resonance with the $\frac{1}{4}$ - and $\frac{3}{4}$ - wave resonance in a real Tesla coil.

2. The position of the inductor greatly affects the behaviour of the Tesla coil.

There are at least two disparate positions – when the inductor is positioned at a distance, greater than the diameter of the winding away from the coil, and when the inductor is positioned fully above the coil.

3. It is indeed necessary to measure the length of the wire from the ground point, when calculating the resonance.

4. A current flows in the ground wire, which is able to extract some power in the load, without affecting the resonance processes in the coil. So far this is the only thing, that we can catch hold of, in the search for FE.

Good luck to everyone! =Multik from Multikon.=

23.02.2012