

## Поиск оптимального конструктива катушки Теслы. Часть 2

4. Продолжим исследование вопроса, как нужно мотать катушку, чтобы совпали её LC- и  $1/4$ -волновой резонансы.

В первой части были получены графики для катушек, намотанных тонким проводом в эмалевой изоляции. Недостаток таких катушек, прежде всего, в их высоком омическом сопротивлении и, как следствие, низкой добротности.

Рассмотрим здесь более «серьёзные» катушки – катушки, аналогичные тем, с которыми работает Капанадзе, - намотанные проводом сечением 1,5 – 2,5 мм<sup>2</sup> в ПВХ изоляции.

Способ построения графиков для определения зоны возможного совпадения резонансов кажется мне вполне приемлемым. Но для уточнения формул, в связи с появлением вокруг провода диэлектрика, который существенно влияет на собственную ёмкость катушки и коэффициент замедления волны в проводе, необходимо провести измерения нескольких экспериментальных катушек.

В процессе работы были сформированы методы измерения, при которых однозначно можно судить, с каким резонансом мы имеем дело – с резонансом в LC-контуре, или с резонансом в проводе, а также способы идентификации совпадения резонансов. Для тех, кто занимается подобными исследованиями, такие моменты чаще всего являются самыми трудными, поэтому начну с описания методов измерения, на примере конкретной катушки.

Основная схема измерения резонансов катушки изображена на рисунке 16.

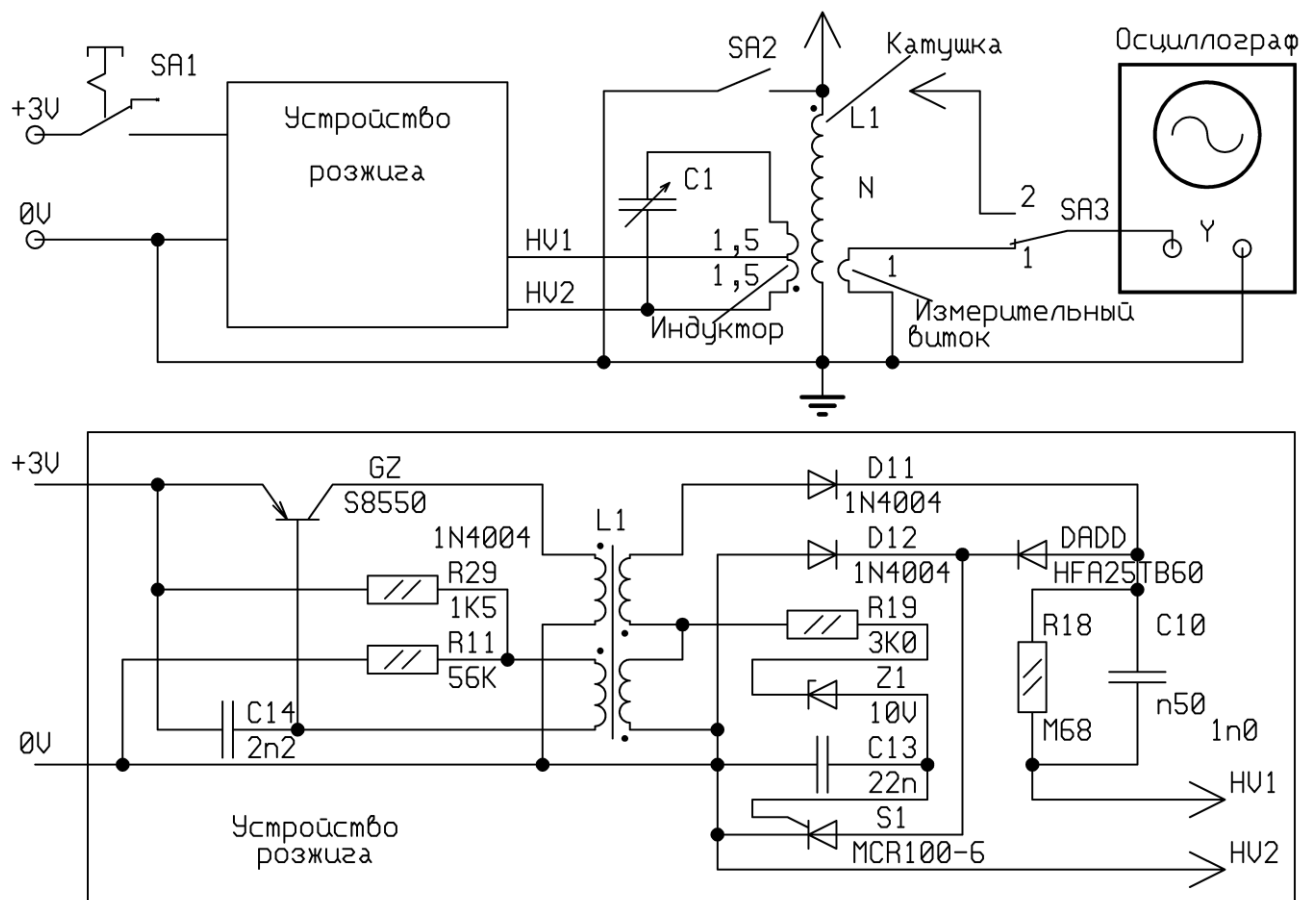


Рис. 16. Основная схема эксперимента.

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 («Казахстан»). Таким образом, индуктор превращается в генератор с изменяемой частотой колебаний.

Измерительный виток намотан под первым витком катушки.

Итак, начинаем работать с катушкой.

**4.1.** Из подручных средств, получилась катушка 1, намотанная на трубе диаметром 5 см, проводом сечением 2,5 мм<sup>2</sup> в ПВХ изоляции. Для того, чтобы начинать измерения, нужно хотя бы представлять, в какой области мы можем ожидать появление резонансов. Поэтому начинать надо с измерений и расчётов.

Результаты измерений параметров этой катушки занесены в таблицу 4.

Как следует из таблицы, расчётная частота  $\frac{1}{4}$ -волнового резонанса в проводе ожидается в районе 6,66 МГц.

**4.1.1.** 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 первый резонанс. Его частота оказалась равной 26 МГц. Следующий резонанс наблюдается на частоте 13 МГц, причём синусоида несколько искажена сигналом с частотой 26 МГц. Очевидно, мы наблюдаем полуволновой и волновой резонансы. Искажение синусоиды вызвано тем, что частоты этих резонансов не точно кратны 2, поскольку коэффициент замедления волны зависит от частоты сигнала. И последний резонанс – на частоте 8,7 МГц. Резонанс на частоте 8,7 МГц связан с тем, что на этой частоте возрастает амплитуда колебаний в индукторе, то есть, это скорее резонанс индуктора – частота резонанса 26 МГц, в проводе, является третьей гармоникой частоты 8,7 МГц, и индуктор это «чувствует».

Теперь, зная частоты полуволнового и волнового резонансов в проводе, нетрудно вычислить частоту четвертьволнового резонанса – она равна 6,5 МГц.

Вычисляем коэффициент замедления волны,  $k_3 = 0,83$ .

**4.1.2.** Размыкаем ключ SA2 – освобождаем свободный конец катушки.

Наблюдая сигнал на экране осциллографа, вращаем ручку конденсатора С1 и находим LC-резонанс контура (12,2 МГц), который почти вдвое превышает частоту  $\frac{1}{4}$ -волнового резонанса в проводе (6,5) МГц. При наблюдении LC-резонанса контура с выхода одного витка, возможны некоторые искажения сигнала. Чистый сигнал наблюдается в положении переключателя SA3 в положении 2, что на практике достигается поднесением щупа осциллографа к верхнему концу катушки, на расстояние не ближе 5 см.

Таблица 4. 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 – 57 витков проводом 2,5 мм <sup>2</sup> на каркасе D = 5 см						
1	Диаметр каркаса	D	0,050	м	измерено	-
2	Длина намотки	h	0,194	м	измерено	-
3	Диаметр жилы	d <sub>ж</sub>	0,0018	м	измерено	-
4	Диаметр провода	d	0,0034	м	d = h / n	-
5	Количество витков	n	57	-	измерено	-
6	Длина провода	l	9,56	м	l = π*(D + d)*n	-
7	Длина рез. волны	λ <sub>пр</sub>	38,25	м	4*l	в проводе
8	Скорость света	c	299792458	м / с	постоянная	-
9	Частота ¼-волн. рез.	f <sub>чрасч1</sub>	7,838	МГц	c / λ <sub>пр</sub> * k <sub>3</sub>	k <sub>3</sub> = 1
10	Коэф. замедления	k <sub>31</sub>	0,85	-	измерено в прошлом опыте	
11	Частота ¼-волн. рез.	f <sub>чрасч</sub>	6,66	МГц	c / λ <sub>пр</sub> * k <sub>31</sub>	k <sub>3</sub> = 0,85
12	Индуктивность	L	42	мкГн	измерено	-
Параметры катушки 1, рассчитанные по результатам измерений в работе.						
13	Частота LC-резон.	f <sub>LC</sub>	12,0	МГц	измерено	-
14	Собствен. ёмкость	C	4,2	пФ	C = 1 / (4*π <sup>2</sup> * f <sub>LC</sub> <sup>2</sup> * L)	
15	Частота 4/4-волн. рез.	F <sub>4чизм</sub>	26	МГц	измерено	-
16	Частота 2/4-волн. рез.	F <sub>2чизм</sub>	13	МГц	измерено	-
17	Частота ¼-волн. рез.	F <sub>чизм</sub>	6,5	МГц	F <sub>чизм</sub> = F <sub>2чизм</sub> / 2	-
18	Коэф. замедления	k <sub>3</sub>	0,83	-	k <sub>3</sub> = f <sub>чизм</sub> / f <sub>чрасч1</sub>	изменился
19	Ёмкость при f <sub>чизм</sub>	C <sub>чизм</sub>	14,3	пФ	C <sub>чизм</sub> = 1 / (4*π <sup>2</sup> * f <sub>чизм</sub> <sup>2</sup> * L)	
20	Добавочная ёмкость	C <sub>доб</sub>	10,2	пФ	C <sub>доб</sub> = C <sub>чизм</sub> - C	-
Бифилярная намотка 56 витков проводом 2,5 мм <sup>2</sup> на каркасе D = 5 см						
21	Количество витков	n	56	-	измерено	-
22	Индуктивность	L	42	мкГн	измерено	-
23	Частота LC-резон.	f <sub>LC</sub>	2,6	МГц	измерено	-
24	Собствен. ёмкость	C <sub>биф</sub>	89,2	пФ	C = 1 / (4*π <sup>2</sup> * f <sub>LC</sub> <sup>2</sup> * L)	
25	Погонная ёмкость	C <sub>пог</sub>	1,59	пФ / вит	C <sub>пог</sub> = C <sub>биф</sub> / n	-
26	Резонанс в проводе	f <sub>хч</sub>	26	МГц	измерено	F <sub>инд</sub> = 8,7 МГц

**4.1.3.** Отключим теперь конденсатор С1 от индуктора. Ударный импульс в индукторе возбуждает колебательный контур на его резонансной частоте.

Попытаемся изменением резонансной частоты LC-контура совместить его резонанс с вычисленным ¼-волновым резонансом в проводе, чтобы убедиться, что мы не ошиблись. Один из способов, который напрашивается, - добавить конденсатор параллельно катушке. В таблице 4 в строке 19 рассчитана ёмкость конденсатора, который необходимо добавить, чтобы совместить резонансы. Но в действительности добавление такого конденсатора не позволило определить совпадение резонансов. Этот приём проходил на низких частотах, а на высоких частотах нагрузка свободного конца катушки на ёмкость эквивалентна соединению его с землёй.

Пришлось увеличивать собственную ёмкость катушки, поднося к ней заземлённый скруглённый лист фольги. При подходе к частоте 6,5 МГц, амплитуда сигнала увеличивается и появляются биения, которые на частоте 6,5 МГц исчезают. То есть, частота определена правильно.

В принципе, можно использовать такой метод для получения совпадения резонансов в катушке. Заземлённый лист фольги может быть расположен внутри каркаса катушки. В катушке Капанадзе 200 Вт роль такого листа может играть вторая обмотка на том же каркасе.

Очевидно, график строить бессмысленно, он покажет результаты, ещё хуже, чем с эмалированным проводом.

**4.2.** Размотаем провод и намотаем ту же катушку бифилярно. Результаты измерений записаны в строках 21 – 26 таблицы 4. Частота LC-резонанса контура снизилась до 2,6 МГц и стала ниже частоты  $\frac{1}{4}$ -волнового резонанса в проводе.

Появился выраженный резонанс на частоте 26 МГц, когда индуктор настроен на частоту 8,7 МГц, то есть, на третьей гармонике индуктора. Это резонанс в проводе, поскольку прикосновение к свободному концу катушки его не сбивает, равно как и его заземление. Похоже, что собственная ёмкость катушки настолько велика, что эквивалентна заземлению для резонанса в проводе.

**4.3.** Для дальнейших экспериментов намотаем вторую катушку 2. Результаты измерений параметров этой катушки занесём в таблицу 5.

Таблица 5. 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 – 86 витков проводом 2,5 мм <sup>2</sup> на каркасе D = 5 см						
1	Диаметр каркаса	D	0,050	м	измерено	-
2	Длина намотки	h	0,292	м	измерено	-
3	Диаметр жилы	d <sub>ж</sub>	0,0018	м	измерено	-
4	Диаметр провода	d	0,0034	м	d = h / n	-
5	Количество витков	n	86	-	измерено	-
6	Длина провода	l	14,43	м	l = π*(D + d)*n	-
7	Длина рез. волны	λ <sub>пр</sub>	57,71	м	4*l	в проводе
8	Скорость света	c	299792458	м / с	постоянная	-
9	Частота $\frac{1}{4}$ -волн. рез.	f <sub>чрасч1</sub>	5,2	МГц	c / λ <sub>пр</sub> *k <sub>3</sub>	k <sub>3</sub> = 1
10	Коэф. замедления	k <sub>31</sub>	0,83	-	измерено в прошлом опыте	-
11	Частота $\frac{1}{4}$ -волн. рез.	f <sub>чрасч</sub>	4,3	МГц	c / λ <sub>пр</sub> *k <sub>31</sub>	k <sub>3</sub> = 0,83
12	Индуктивность	L	66	мкГн	измерено	-
Параметры катушки 2, рассчитанные по результатам измерений в работе.						
13	Частота LC-резон.	f <sub>LC</sub>	9,2	МГц	измерено	-
14	Собствен. ёмкость	C	4,5	пФ	C = 1 / (4*π <sup>2</sup> * f <sub>LC</sub> <sup>2</sup> * L)	-
15	Частота $\frac{4}{4}$ -волн. рез.	F <sub>4чизм</sub>	18,5	МГц	измерено	-
16	Частота $\frac{2}{4}$ -волн. рез.	F <sub>2чизм</sub>	8,6	МГц	измерено	-
17	Частота $\frac{1}{4}$ -волн. рез.	F <sub>чизм</sub>	4,3	МГц	F <sub>чизм</sub> = F <sub>2чизм</sub> / 2	-
18	Коэф. замедления	k <sub>3</sub>	0,83	-	k <sub>3</sub> = F <sub>3чизм</sub> / (3*f <sub>чрасч1</sub> )	не изменился
19	Частота $\frac{3}{4}$ -волн. рез.	F <sub>3чизм</sub>	12,9	МГц	F <sub>3чизм</sub> = 3* F <sub>чизм</sub>	-

Как видно из таблицы, резонансная частота колебательного контура понизилась, частота колебаний в проводе тоже понизилась и стала равной 4,3 МГц. Проверка с помощью заземлённого листа фольги подтвердила правильность определения резонанса. LC-резонанс ушёл дальше от  $\frac{1}{4}$ -волнового, но зато приблизился к  $\frac{3}{4}$ -волновому резонансу. Коэффициент замедления волны остался прежним.

**4.4.** Намотаем третью катушку 3 проводом 1,5 мм<sup>2</sup>. Результаты измерений параметров этой катушки занесём в таблицу 6.

Таблица 6. Результаты измерений и расчётов параметров катушки 3.

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Величина параметра	Размерность	Формула	Примечание
1	2	3	4	5	6	7
Катушка 3 – 73 витка проводом 1,5 мм <sup>2</sup> на каркасе D = 5 см						
1	Диаметр каркаса	D	0,050	м	измерено	-
2	Длина намотки	h	0,217	м	измерено	-
3	Диаметр жилы	d <sub>ж</sub>	0,0014	м	измерено	-
4	Диаметр провода	d	0,00297	м	d = h / n	-
5	Количество витков	n	73	-	измерено	-
6	Длина провода	l <sub>пр</sub>	12,15	м	l = π*(D + d)*n	-
7	Длина рез. волны	λ <sub>пр</sub>	48,59	м	4*l	в проводе
8	Скорость света	c	299792458	м / с	постоянная	-
9	Частота 1/4-волн. рез.	f <sub>чрасч1</sub>	6,17	МГц	c / λ <sub>пр</sub> * k <sub>3</sub>	k <sub>3</sub> = 1
10	Скорость в проводе	v <sub>пр</sub>	243000000	м / с	v <sub>пр</sub> = l <sub>пр</sub> / t <sub>зад</sub>	-
11	Козф. замедления	k <sub>31</sub>	0,83	-	измерено в прошлом опыте	-
12	Частота 1/4-волн. рез.	f <sub>чрасч</sub>	5,1	МГц	c / λ <sub>пр</sub> * k <sub>31</sub>	k <sub>3</sub> = 0,81
13	Индуктивность	L	62	мкГн	измерено	-
Параметры катушки 3, рассчитанные по результатам измерений в работе.						
14	Частота LC-резон.	f <sub>LC</sub>	9,5	МГц	измерено	-
15	Собствен. ёмкость	C	4,5	пФ	C = 1 / (4*π <sup>2</sup> * f <sub>LC</sub> <sup>2</sup> * L)	-
16	Частота 6/4-волн. рез.	F <sub>4чизм</sub>	33,0	МГц	измерено	-
17	Частота 4/4-волн. рез.	F <sub>4чизм</sub>	21,5	МГц	измерено	-
18	Частота 2/4-волн. рез.	F <sub>2чизм</sub>	10,4	МГц	измерено	-
19	Частота 1/4-волн. рез.	F <sub>чизм</sub>	5,2	МГц	F <sub>чизм</sub> = F <sub>2чизм</sub> / 2	-
20	Козф. замедления	k <sub>3</sub>	0,84	-	k <sub>3</sub> = F <sub>3чизм</sub> / (3*f <sub>чрасч1</sub> )	изменился
21	Частота 3/4-волн. рез.	F <sub>3чизм</sub>	15,6	МГц	F <sub>3чизм</sub> = 3* F <sub>чизм</sub>	-

Собственно, ничего нового. Измерения проводились только для того, чтобы определить собственную ёмкость катушки и коэффициент замедления волны.

**4.5.** Имеет смысл построить графики, аналогичные тем, которые строились в первой части, только дополнить их графиками зависимости частоты 3/4-волнового резонанса в проводе от длины намотки.

**4.5.1.** Формула для расчёта индуктивности остаётся та же (1)

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

где L – индуктивность, мкГн, D<sub>кат</sub> – диаметр катушки, см, между центрами витков, h – длина намотки, см, W – количество витков.

**4.5.2.** Для расчёта собственной ёмкости может быть использована формула (2), только эквивалентная диэлектрическая проницаемость изоляции провода должна быть определена экспериментально:

$$C_0 = \pi * D / [8,3 * \ln(\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 1})] * \epsilon_3,$$

где C<sub>0</sub> - Собственная емкость катушки, пФ, D - диаметр катушки, см,

α = τ/d<sub>0</sub>, τ - расстояние между центрами соседних витков (шаг намотки), для провода 2,5 мм<sup>2</sup> равен толщине провода с изоляцией:

$$\tau = 0,34 \text{ см};$$

$d_0$  - диаметр провода без изоляции, в рассматриваемом случае:

$$d_0 = 0,18 \text{ см};$$

$\epsilon_3$  – эквивалентная диэлектрическая проницаемость изоляции провода.

$$\alpha_1 = \tau_1/d_0 = 0,34 / 0,18 = 1,89.$$

Рассчитаем ёмкость катушки, приняв  $\epsilon_3 = 1$ :

$$C_{01} = \pi * 5 [8,3 * \ln(1,89 + \sqrt{(1,89^2 - 1)})] * 1 = 2,28 \text{ [пФ]}.$$

Экспериментально полученное значение ёмкости для катушки 1 равно 4,2 пФ, а для катушки 2 – 4,5 пФ. Это соответствует тому, что диэлектрическая проницаемость ПВХ при увеличении частоты понижается. Диапазон рабочих частот катушки 2 ближе к совпадению резонансов, поэтому для построения графиков примем за основу ёмкость катушки 2.

$$\text{Тогда } \epsilon_3 = 4,5 / 2,28 = 2.$$

Но это для общего развития. Пользоваться этой формулой мы не будем. Используем значения, полученные экспериментально.

**4.5.3.** Нас интересует поиск длины намотки, при которой совпадают LC- и  $3/4$ -волновой резонансы. Построим совмещённые графики зависимости длины волны с частотой LC-резонанса от длины намотки и длины волны  $3/4$ -волнового резонанса в проводе катушки.

Для построения графика зависимости длины волны с частотой LC-резонанса от длины намотки воспользуемся формулой (4):

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

Ёмкость  $C$  возьмём из эксперимента.

Сначала построим график для катушек 1 и 2, намотанных проводом 2,5 мм<sup>2</sup>.

Подставим ёмкость  $C = 4,5$  пФ, как получилось для катушки 2.

Подставив численные значения диаметра каркаса,  $D = 5$  см, внешний диаметр провода,  $d = 0,34$  см и ёмкость  $C = 4,5$  пФ, получим формулу для построения графика зависимости длины волны с частотой LC-резонанса от длины намотки:

$$\begin{aligned} \lambda_{LC} &= 299792458 * 2 * \pi * 10^{-3} * 0,1 * (h/0,34) * \sqrt{[5,34 * 4,5 * 10^{-12} / (h/5,34 + 0,44)]} = \\ &= 299792458 * 2 * \pi * 10^{-3} * 0,1 * 2,94 * h * 4,9 * 10^{-6} / \sqrt{(h/5,34 + 0,44)} = \\ &= 0,299792458 * 2 * \pi * 0,294 * h * 4,9 / \sqrt{(h/5,34 + 0,44)} = 2,75 * h / \sqrt{(h/5,34 + 0,44)} \quad (17) \end{aligned}$$

Для построения графиков зависимости длины волны  $3/4$ -волнового резонанса в проводе катушки от длины намотки, выразим длину провода через длину намотки (при  $k_3 = 1$ ), с учётом того, что длина его волны в три раза меньше, чем  $1/4$ -волнового резонанса и величину  $h$  необходимо представлять в см:

$$\lambda_{3ЧВ1} = 4/3 * \pi * (D+d) * 0,01 * h/d = 4/3 * \pi * 0,0534 * 0,01 * h/0,0034 = 0,66 * h; \quad (18)$$

Вид формул для программы AGrapher:

$$2.75 * x / \sqrt{(x/5.34 + 0.44)}$$

и для резонанса в проводе:

$$\text{- при } 3/4\text{-волновом: } 0.66 * x / 0.83 \quad (k_3 = 0,83)$$

$$\text{- при } 1/4\text{-волновом: } 1.98 * x / 0.83 \quad (k_3 = 0,83)$$

Графики зависимости длины волны с частотой LC-резонанса от длины намотки и длины волны  $\frac{3}{4}$ -волнового резонанса в проводе катушки, намотанной на круглой трубе диаметром 50 мм, проводом сечением  $2,5 \text{ мм}^2$  в изоляции ПВХ диаметром 3,4 мм, представлены на рисунке 17.

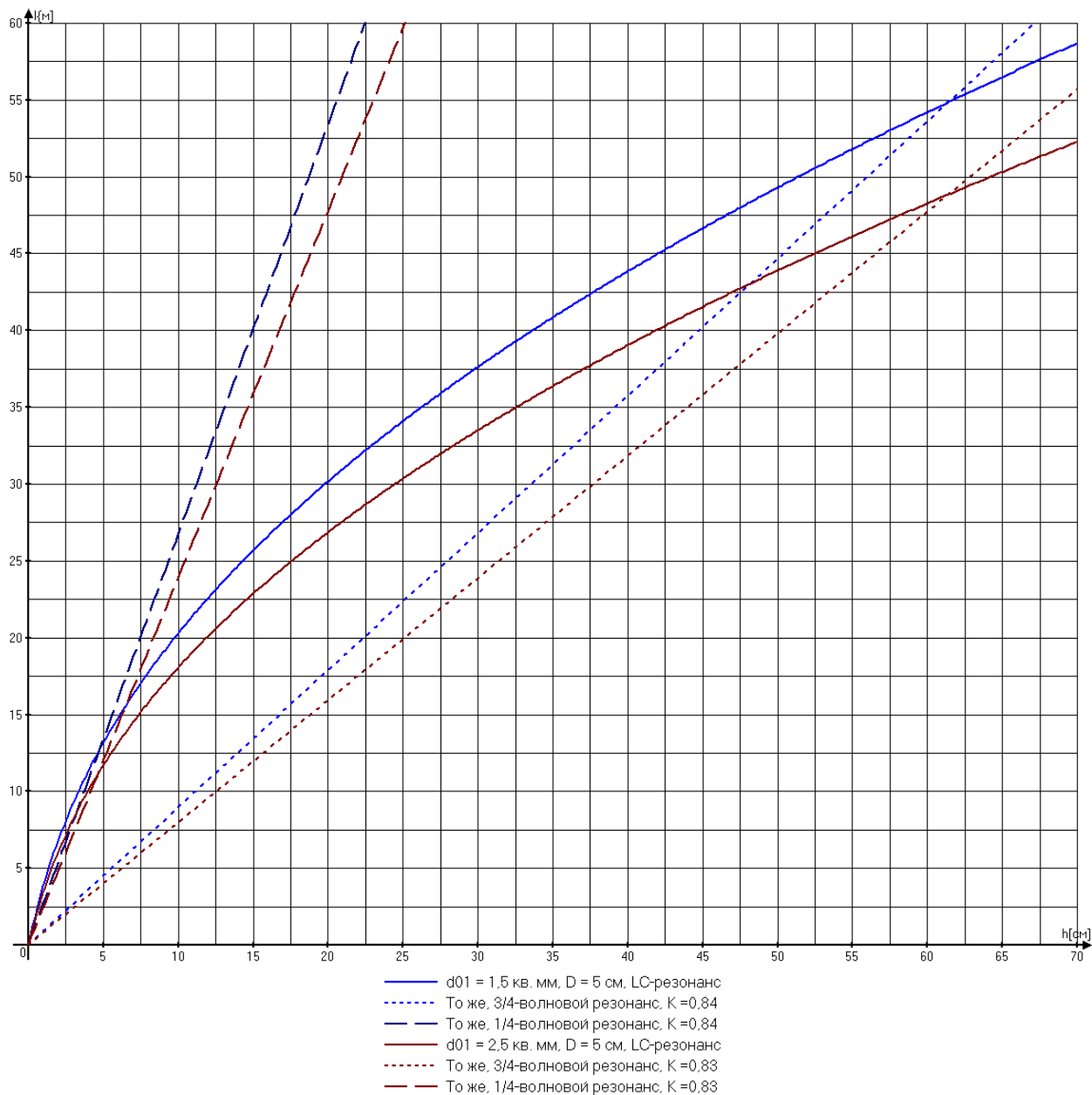


Рис. 17. Графики зависимости длины волны с частотой LC-резонанса,  $\frac{1}{4}$ -волнового и  $\frac{3}{4}$ -волнового резонансов от длины намотки катушек, намотанных на трубе диаметром 50 мм, для проводов в изоляции ПВХ, сечением  $2,5 \text{ мм}^2$  диаметром 3,4 мм и сечением  $1,5 \text{ мм}^2$  диаметром 2,97 мм.

**4.5.4.** Построим теперь график для катушки 3, намотанной проводом  $1,5 \text{ мм}^2$ . Подставим ёмкость  $C = 4,5 \text{ пФ}$ , как получилось для катушки 3.

Подставив численные значение диаметра каркаса,  $D = 5 \text{ см}$ , внешний диаметр провода,  $d = 0,34 \text{ см}$  и ёмкость  $C = 4,5 \text{ пФ}$ , получим формулу для построения графика зависимости длины волны с частотой LC-резонанса от длины намотки:

$$\lambda_{LC} = 299792458 * 2 * \pi * 10^{-3} * 0,1 * (h/0,297) * \sqrt{[5,297 * 4,5 * 10^{-12} / (h/5,297 + 0,44)]} = 299792458 * 2 * \pi * 10^{-3} * 0,1 * 3,37 * h * 4,88 * 10^{-6} / \sqrt{(h/5,297 + 0,44)} =$$

$$= 0,299792458 * 2 * \pi * 0,337 * h * 4,88 / \sqrt{(h/5,297 + 0,44)} = 3,1 * h / \sqrt{(h/5,297 + 0,44)} \quad (19)$$

Для построения графиков зависимости длины волны  $\frac{3}{4}$ -волнового резонанса в проводе катушки от длины намотки, выразим длину провода через длину намотки (при  $k_3 = 1$ ), с учётом того, что длина его волны в три раза меньше, чем  $\frac{1}{4}$ -волнового резонанса и величину  $h$  необходимо представлять в см:

$$\lambda_{3чВ1} = \frac{4}{3} * \pi * (D+d1) * 0,01 * h / d1 = \frac{4}{3} * \pi * 0,05297 * 0,01 * h / 0,00297 = 0,75 * h; \quad (20)$$

Вид формул для программы AGrapher:

$$3.1 * x / \sqrt{(x/5.297 + 0.44)}$$

и для резонанса в проводе:

- при  $\frac{3}{4}$ -волновом:  $0.75 * x / 0.84$  ( $k_3 = 0,84$ )

- при  $\frac{1}{4}$ -волновом:  $2.24 * x / 0.84$  ( $k_3 = 0,84$ )

Графики представлены на том же рисунке 17.

Из графиков следует, что для каждого из двух проводов существует длина намотки, при которой LC-резонанс совпадает с  $\frac{1}{4}$ -волновым или  $\frac{3}{4}$ -волновым резонансом. Эта длина зависит от коэффициента замедления волны и находится вблизи пересечения пунктирных линий со сплошной линией того же цвета. Графики не отличаются точностью, поскольку исходные формулы не отражают зависимости собственной ёмкости контура и коэффициента замедления волны от частоты.

Конечно, катушки с совмещённым  $\frac{3}{4}$ -волновым резонансом получаются внушительных размеров, но зато при той же ёмкости будут иметь большую индуктивность и, соответственно, добротность, поэтому более полно удовлетворяют рекомендациям Н.Теслы.

При практическом изготовлении их следует намотать ещё длиннее, и совмещать резонансы не отрезанием провода, а внесением внутрь каркаса проводящей заземлённой пластины. (Разумеется, со стороны индуктора). Это позволит скорректировать в процессе экспериментов изменение ёмкости контура от присутствия посторонних предметов.

Отдельно хочу акцентировать внимание на способе определения резонансов в проводе. Если измерение частоты LC-резонанса обычно не вызывает проблем, то с резонансом в проводе чаще всего возникают затруднения. Для определения частоты четвертьволнового резонанса в проводе, оба конца провода нужно заземлить. Рядом с началом катушки (со стороны индуктора) намотать один виток провода и подключить к нему осциллограф. Если параллельно индуктору подключён конденсатор, его следует удалить. При отсутствии конденсатора ударные импульсы в индукторе чаще всего возбуждают в проводе полноволновой резонанс, то есть,  $4/4$  волны. Измеряем осциллографом частоту этого резонанса и делим её на 4. Получаем частоту четвертьволнового резонанса.

**5.** Теперь следует довести до ума работу, проделанную в первой части статьи.

Дополним нарисованные в первой части статьи графики для проводов в эмалевой изоляции, с диаметрами по меди 0,35 мм и 0,56 мм.

**5.1.** Дополненные графики для трубы диаметром 5 см представлены на рисунке 18.

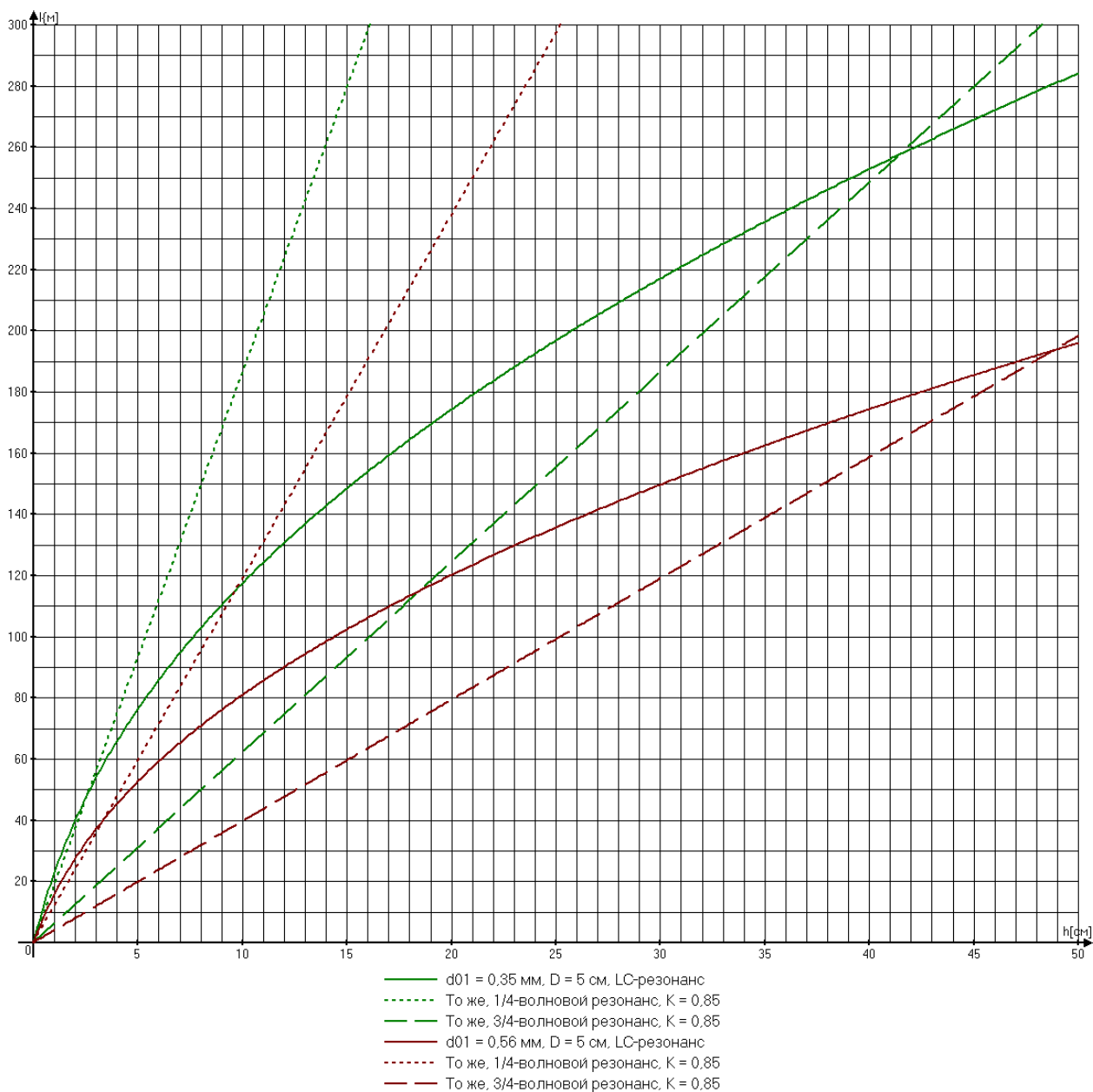


Рис. 18. Графики зависимости длины волны с частотой LC-резонанса, 1/4-волнового и 3/4-волнового резонансов от длины намотки, для проводов в эмалевой изоляции, с диаметрами по меди 0,35 мм и 0,56 мм, намотанных на трубе диаметром 50 мм.

Из графиков следует, что для каждого из двух проводов существует длина намотки, при которой LC-резонанс совпадает с 1/4-волновым или 3/4-волновым резонансом.

## 5.2. Графики для трубы диаметром 3,2 см представлены на рисунке 19.

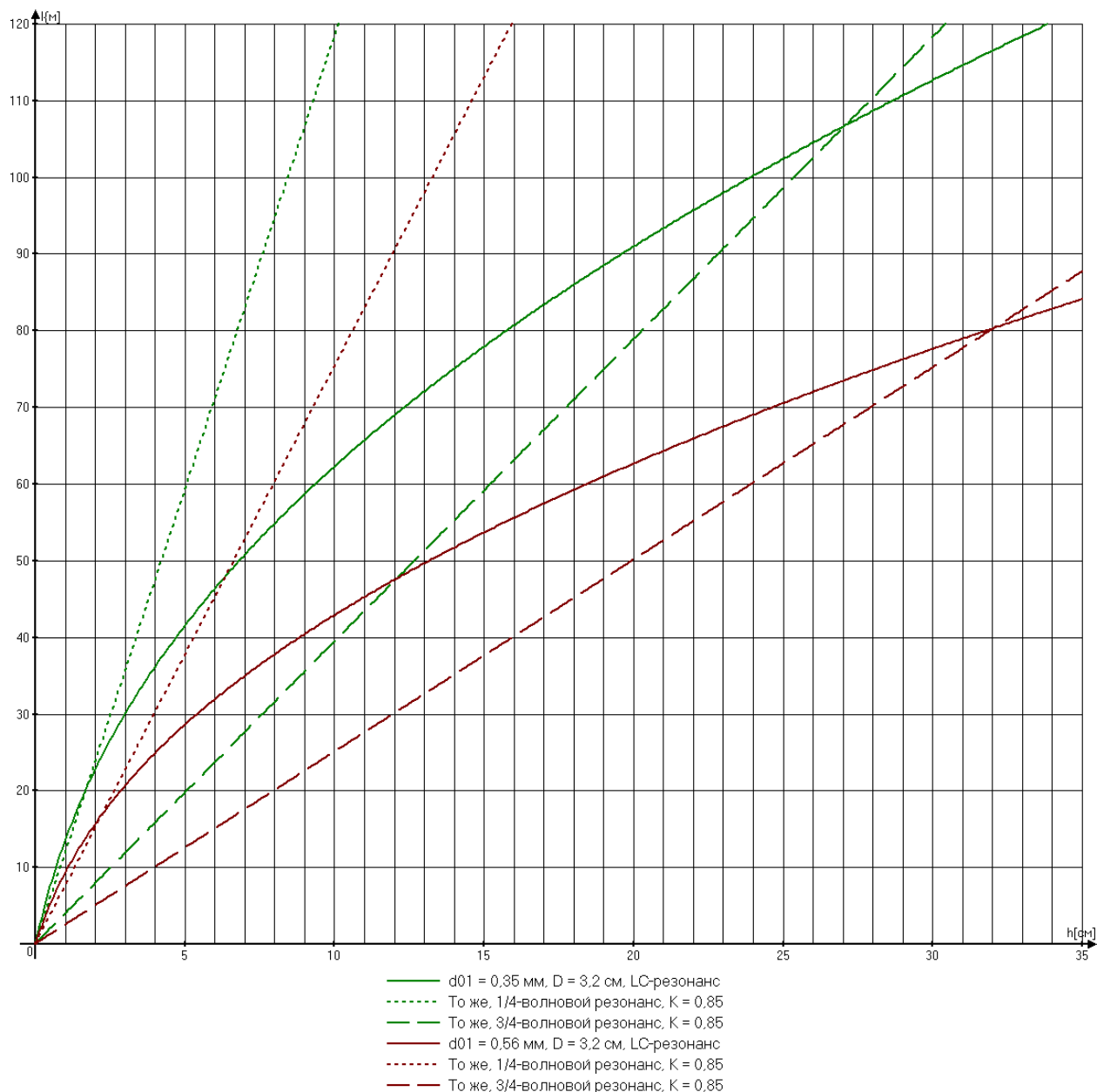


Рис. 19. Графики зависимости длины волны с частотой LC-резонанса,  $1/4$ -волнового и  $3/4$ -волнового резонансов от длины намотки, для проводов в эмалевой изоляции, с диаметрами по меди 0,35 мм и 0,56 мм, намотанных на трубе диаметром 32 мм.

Из графика следует, что для более тонкой трубы длина намотки короче.

### 5.3. И, наконец, графики для трубы диаметром 11 см - на рисунке 20.

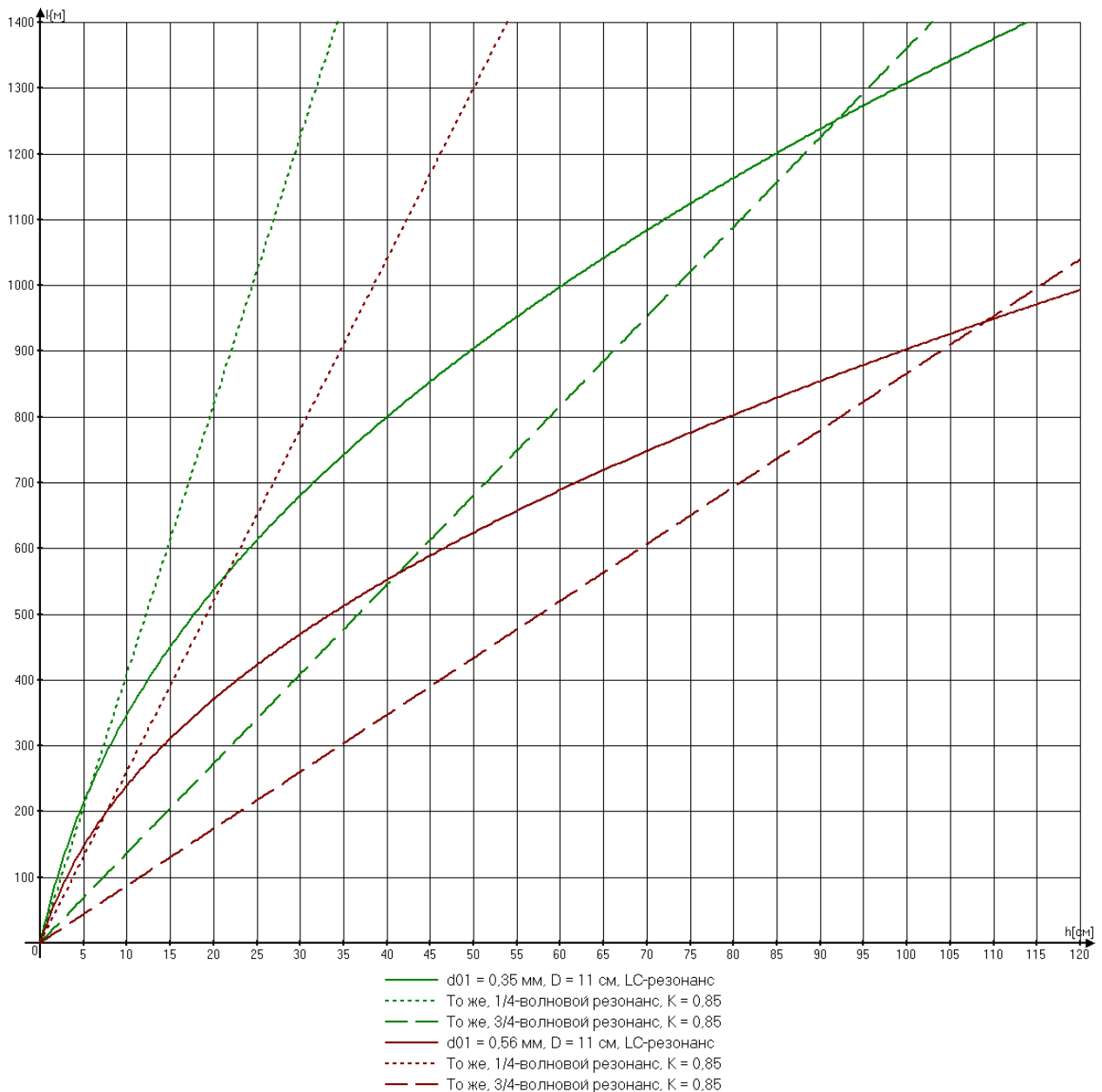


Рис. 20. Графики зависимости длины волны с частотой LC-резонанса,  $1/4$ -волнового и  $3/4$ -волнового резонансов от длины намотки, для проводов в эмалевой изоляции, с диаметрами по меди 0,35 мм и 0,56 мм, намотанных на трубе диаметром 110 мм.

### 6. Теперь, кажется, с резонансами в катушках Теслы мы разобрались.

И стало понятно, что длинная катушка с тонким проводом вполне может выполнить условия, сформулированные Теслой, если в них используется резонанс не первого, а третьего или даже пятого порядка.

Осталось дело за малым: — намотать пару катушек и проверить справедливость патента Теслы.

Всем удачи!

=Multik из Мультикона.=

26.01.2012.