

**УДК 537.1**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧЕТВЕРТЬ-ВОЛНОВЫХ ОТРЕЗКОВ ДЛИН ВОЛН  
В РЕЗОНАНСНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ЧАСТОТАХ  
НИЖЕ 150 КГЦ**

**Быковский Алексей Александрович**

*инженер-конструктор,*

*филиал АО «НПО им. С.А. Лавочкина» в г. Калуга*

*г. Калуга, Российская Федерация*

*e-mail: [alby76@yandex.ru](mailto:alby76@yandex.ru)*

**Аннотация:** Показано решающее влияние частот ниже 150 кГц на увеличение диэлектрической проницаемости диэлектрических материалов в электрически длинных линиях. Вследствие увеличения диэлектрической проницаемости происходит уменьшение длины волны и увеличение потерь в резонансных линиях электропередачи. Исходя из экспериментальных данных К. Хайдарова предложен математический аппарат для определения четверть-волновых отрезков длин волн в резонансных линиях электропередачи на резонансных частотах до 150 кГц.

**Ключевые слова:** Резонансный трансформатор Тесла, Резонансные электрические линии, Резонансная передача электрической энергии, Диэлектрическая проницаемость, Коэффициент К. Хайдарова, Резонансная электрическая сверхпроводимость.

**DETERMINATION OF QUARTER-WAVE SEGMENTS OF WAVE  
LENGTHS IN RESONANT POWER LINES AT FREQUENCIES BELOW 150  
KHZ**

**Bykovsky Alexey Alexandrovich**

**Abstract:** The decisive influence of frequencies below 150 kHz on the increase in the dielectric constant of dielectric materials in electrically long lines is shown. Due to the increase in dielectric constant, a decrease in the wavelength occurs, and an increase in losses in resonant power lines. Based on the experimental data of K. Khaidarov, a mathematical apparatus was proposed for determining the quarter-wave segments of wavelengths in resonant power lines at resonant frequencies up to 150 kHz.

**Keywords:** Tesla resonant transformer, Resonant electric lines, Resonant transmission of electrical energy, Dielectric permeability, K. Khaidarov coefficient, Resonant electrical superconductivity.

Как хорошо известно [1, стр. 41-44; 2], длина линии, предназначенная для резонансного способа передачи электрической энергии должна быть равна целому количеству четверть-волновых отрезков длины волны, на которой осуществляется данная резонансная передача. Длина резонансной линии определяется математическим выражением:

$$l_{\text{л}} = (2 \cdot n + 1) \cdot l_{\frac{1}{4}\lambda} \quad (1)$$

где  $l_{\text{л}}$  – длина резонансной линии электропередачи, м;

$n$  – целое число четверть-волновых отрезков длины волны;

$l_{\frac{1}{4}\lambda}$  – длина четверть-волнового отрезка длины волны, м.

При таком соотношении длин электромагнитной волны и резонансной линии система по резонансному способу передачи электрической энергии (сама линия и совокупность двух резонансных трансформаторов Тесла) будут работать на одной общей для них резонансной частоте, которая и задается резонансным трансформатором Тесла (РТТ).

При таком, совершенно необходимом для резонансного способа передачи электрической энергии, соотношении длин как провода катушки-осциллятора РТТ, так и резонансной линии, система передачи электрической энергии практически превращается в сверхпроводник при комнатной температуре.

В классической литературе по электротехнике такая линия носит название «Линия без потерь» [3, стр. 75-77]. Одновременно, указывается на тот факт, что в такой линии электромагнитная энергия осуществляет колебания в виде стоячей волны, и в такой линии нет бегущей волны, вследствие чего, передача активной электрической мощности по такой линии вдоль оси этой линии не может быть осуществлена.

Тем не менее, если к «началу» и «концу» линии подключить два идентичных друг другу РТТ которые настроены на четверть-волновой резонанс с самой резонансной линией, то энергия электромагнитной волны свободно потечёт вдоль оси такой линии от генератора к приемнику. Для такой линии не нужен обратный провод, и, как напряжение, так и ток будут постоянно изменять своё значение вдоль оси линии по гармоническому закону, характерному для электрически длинных линий. Данный резонансный способ передачи электрической энергии многократно проверялся опытным путем многими исследователями, см. например [1, стр. 358-361, стр. 382-398; 4; 5].

Как очевидно из формулы (1) длина резонансной линии прямо пропорциональна длине четверть-волнового отрезка длины волны. В свою очередь длина четверть-волнового отрезка длины волны равна длине провода катушки-осциллятора РТТ.

Длина провода катушки-осциллятора РТТ определяется выражением:

$$l_2 = l_1 = \frac{c}{4 \cdot f_{\text{рез}} \cdot \sqrt{\epsilon_{r2} \cdot \mu_{r2}}} \quad (2)$$

где  $l_2$  – длина провода катушки-осциллятора, м;

$c$  – скорость распространения электромагнитной волны в воздухе ( $c = 299704000 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ );

$f_{\text{рез}}$  – резонансная частота, Гц.;

$\epsilon_{r2}$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика провода;

$\mu_{r2}$  – магнитная проницаемость диэлектрика провода (для меди  $\mu_{r2} = 0,99991 \approx 1$ ).

Однако для частот ниже 150 кГц (диапазон рабочих резонансных частот резонансной линии лежит в диапазоне от 1 кГц до 3000 кГц) существует эффект дисперсии электромагнитной волны в электрически длинной линии, коей и является резонансная система по передаче электрической энергии. То есть на частотах ниже 150 кГц скорость движения электромагнитной волны вдоль оси провода электрически длинной линии всё сильнее убывает с уменьшением резонансной частоты вследствие возрастания диэлектрической проницаемости диэлектрика провода. Другими словами, при неизменности самой резонансной частоты, длина четверть-волнового отрезка длины волны уменьшается. Это, в свою очередь, приводит к увеличению потерь в резонансной линии и уменьшению её эффективности передачи.

Наличие факта уменьшения скорости движения электромагнитной волны в электрически длинных линиях на низких частотах, объясняет ограничение по нижнему диапазону рабочей частоты  $\approx 1$  кГц экспоненциальным ростом потерь в диэлектрике провода энергии электромагнитной волны именно на низких частотах.

Коэффициент увеличения диэлектрической проницаемости носит название коэффициента Карима Хайдарова (по фамилии первооткрывателя) [6]:  $k_{KH} \geq 1$ .

И формулу (2) для резонансных частот ниже 150 кГц, и с учётом того, что для провода катушки-осциллятора РТТ  $\mu_{r2} = 1$ , следует переписать в следующий вид:

$$l_2 = l_1 \frac{1}{4} \lambda = \frac{c}{4 \cdot f_{рез} \cdot \sqrt{\epsilon_{r2} \cdot k_{KH}}} \quad (3)$$

Из анализа статьи [6] значения коэффициента Хайдарова для разных частот приведены в таблице 1.

**Таблица 1**

**Значения коэффициента Хайдарова для электрически длинных линий для разных частот**

Частота, кГц	Значение коэффициента Хайдарова
--------------	---------------------------------

200	1
150	1
100	1,027
70	1,14
50	1,439
35	1,959
28	2,561
20	3,484
14	4,842
10	6,787
7	9,955
5	13,575
3,5	19,457
2,8	24,887
2	36,199
1,4	48,869
1	69,683
0,7	100
0,5	143,891
0,25	277,828
0,1	676,018
0,05	1344,796

Таким образом, длина четверть-волнового отрезка на частотах ниже 150 кГц существенным образом определяется диэлектрической проницаемостью диэлектрика провода.

В качестве изоляции провода катушки-осциллятора целесообразно использовать провод с изоляцией типа ПЭВД (полиэтилен высокого давления). Это целесообразно из-за низкой диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$  и тангенса

угла диэлектрических потерь  $tg\delta$  с одной стороны, и относительной гибкости (провод наматывают на цилиндр катушки-осциллятора) и высокого удельного электрического сопротивления изоляции  $\rho_d$  с другой стороны. Также изоляция из ПЭВД обладает повышенным пробивным напряжением  $E_{пр}$  относительно других диэлектриков, что актуально в условиях близости витков провода катушки-осциллятора. Прочностные же характеристики ПЭВД не особо важны, поскольку резонансные катушки РТТ находятся в статическом состоянии относительно друг друга за всё время эксплуатации РТТ.

В качестве изоляции провода ОРЭЛ (однопроводниковой резонансной электрической линии) целесообразно применять «Фторопласт Ф4» (политетрафторэтилен – ПТФЭ) и его модификации. Данный материал также обладает низкой диэлектрической проницаемостью, малым тангенсом угла диэлектрических потерь, вдвое меньшим пробивным напряжением относительно ПЭВД, высоким удельным электрическим сопротивлением изоляции провода, хорошими прочностными характеристиками и исключительной стойкостью к изменению погодных условий.

Для ПТФЭ:

$$\rho_d = 1,2 \cdot 10^{16} \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}}; \varepsilon_r = 2,1; tg\delta = 0,00024; E_{пр} = 2,5 \cdot 10^7 \frac{\text{В}}{\text{м}};$$

Для ПЭВД:

$$\rho_d = 1,5 \cdot 10^{15} \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}}; \varepsilon_r = 2,25; tg\delta = 0,00025; E_{пр} = 5 \cdot 10^7 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Значения длин четверть-волновых отрезков электрически длинных линий для проводов с изоляцией из ПТФЭ и ПЭВД для частот ниже 150 кГц приведены в таблице 2.

**Таблица 2**

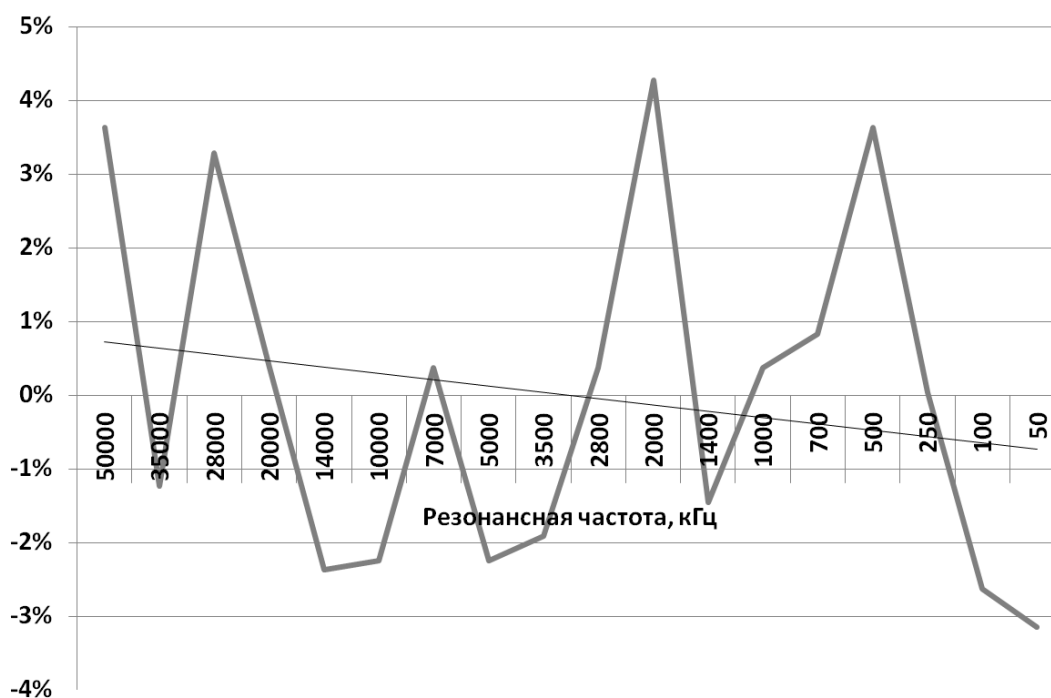
**Значения длин четверть-волновых отрезков электрически длинных линий для проводов с изоляцией из ПТФЭ и ПЭВД для частот ниже 150 кГц**

Частота, кГц	Длина четверть-волнового отрезка для ПТФЭ ( $\epsilon_r = 2,1$ ), м	Длина четверть-волнового отрезка для ПЭВД ( $\epsilon_r = 2,25$ ), м
200	258,77	250,00
150	345,03	333,33
100	510,7	493,38
70	692,47	668,99
50	862,88	833,62
35	1056,5	1020,7
28	1155,0	1115,9
20	1386,4	1339,4
14	1680,0	1623,0
10	1986,6	1919,2
7	2343,3	2263,9
5	2809,4	2714,1
3,5	3352,3	3238,7
2,8	3705,2	3579,5
2	4301,0	4155,2
1,4	5288,2	5108,9
1	6200,0	5989,7
0,7	7393,6	7142,9
0,5	8629,1	8336,5
0,25	12420	11999
0,1	19905	19231
0,05	28226	27269

Исходя из анализа цифр таблицы 1 для частот 50 кГц и ниже возможно подобрать простую формулу расчёта коэффициента Хайдарова:

$$k_{\text{КХ}} = \frac{69425}{f_{\text{рез}}} \quad (4)$$

Погрешность расчётных данных по формуле (4) относительно экспериментальных [6] представлена на рисунке 1.



**Рис. 1. Погрешность расчётных данных коэффициента Хайдарова относительно экспериментальных**

На рисунке 1 жирной серой линией показана погрешность, тонкой чёрной прямой линией - линейный тренд изменения погрешности.

Из анализа кривой можно сделать следующие выводы.

Погрешность расчётных данных коэффициента Хайдарова относительно экспериментальных не превышает 5% для всех 18 экспериментальных частот от 50 кГц и ниже.

Хаотичность разброса цифр погрешности относительно нулевой оси свидетельствует, скорее всего, именно о погрешности измерения диэлектрической проницаемости диэлектрика провода в экспериментальном стенде [6].

Кроме того, если просуммировать все погрешности и поделить на количество измерений (18 резонансных частот – 18 измерений), то получится



величина  $-0,0001926\%$ , что весьма близко к 0. Это также характерно для погрешности экспериментального измерения.

Подставим формулу (4) в формулу (2):

$$l_{\frac{1}{4}\lambda} = \frac{c}{4 \cdot f_{\text{рез}} \cdot \sqrt{\epsilon_{r2} \cdot \mu_{r2} \cdot k_{\text{КХ}}}} = \frac{299704000 \cdot \sqrt{f_{\text{рез}}}}{4 \cdot f_{\text{рез}} \cdot \sqrt{\epsilon_{r2} \cdot 0,99991 \cdot 69425}}$$

$$l_{\frac{1}{4}\lambda} = \frac{2,8438 \cdot 10^5}{\sqrt{f_{\text{рез}} \cdot \epsilon_{r2}}} \quad (5)$$

Таким образом, на частотах 50 кГц и ниже (основной диапазон частот для задачи резонансной передачи электрической энергии) для расчёта четверти длины волны можно применять формулу (5). Длина волны при этом обратно пропорциональна НЕ резонансной частоте, а обратно пропорциональна КОРНЮ (в степени 0,5) от резонансной частоты.

Автор данной статьи предполагает, что неверное понимание закона определения длины волны на низких частотах (десятки и единицы килогерц) не позволило до сих пор сконструировать эффективную резонансную линию электропередачи длиной хотя бы в 5,7,9,11 (см. формулу (1)) и т.д. длин четверть-волновых отрезков длины волны резонансной частоты. По крайней мере, решающего экономического эффекта, насколько это известно автору, пока достигнуто исследователями не было.

На частотах 150 кГц и выше дисперсии электромагнитных волн не наблюдается и для расчета длины четверти волны можно применять классическую формулу (2).

Сложнее обстоит дело с частотами 50 – 150 кГц.

Используя известные экспериментальные значения [6] увеличения диэлектрической проницаемости на частотах 50 – 150 кГц, методом линейной экстраполяции получены расчётные формулы коэффициента Карима Хайдарова и четверть-волновых отрезков длин волн для провода с медной жилой.

Данные расчётные формулы приведены в таблице 3.

Таблица 3

**Расчётные формулы коэффициента Карима Хайдарова и четверть-волновых отрезков длин волн во всём диапазоне резонансных частот**

Диапазон резонансных частот, кГц	Расчётная формула для коэффициента Карима Хайдарова $k_{КХ}$	Расчётная формула для четверть-волнового отрезка длины волны $l_{\frac{1}{4}\lambda}$ , м
До 50	$k_{КХ} = \frac{69425}{f_{рез}}$	$l_{\frac{1}{4}\lambda} = \frac{2,8438 \cdot 10^5}{\sqrt{f_{рез} \cdot \epsilon_{r2}}}$
50 – 150	$k_{КХ} = \left( \frac{150000 - f_0}{3 \cdot f_0} \right)^2 + 1$	$l_{\frac{1}{4}\lambda} = \frac{7,4926 \cdot 10^7}{f_{рез} \cdot \sqrt{\epsilon_{r2} \cdot \left[ \left( \frac{150000 - f_0}{3 \cdot f_0} \right)^2 + 1 \right]}}$
Свыше 150	$k_{КХ} = 1$	$l_{\frac{1}{4}\lambda} = \frac{7,4926 \cdot 10^7}{f_{рез} \cdot \sqrt{\epsilon_{r2}}}$

Необходимо отметить, что данные расчётные формулы не раскрывают понимания такого физического явления, как изменение дисперсии электромагнитной волны в электрически длинной линии на частотах ниже 150 кГц. Ответ на данный вопрос не является темой данной статьи. Явление дисперсии обосновывается в приводимой многократно выше работе [6].

Приведённые в таблице 3 значения расчётных формул позволяют производить корректные расчёты четверть-волнового отрезка длины волны с погрешностью, гарантированно ниже 5% (см. выводы из рис. 1).

Отклонение расчётных значений коэффициента К. Хайдарова, рассчитанных по формулам из таблицы 3 относительно экспериментальных данных [6] приведено в таблице 4.

Таблица 4

**Отклонение расчётных значений коэффициента К. Хайдарова, рассчитанных по формулам из таблицы 3 относительно экспериментальных данных**

Резонансная частота, кГц	Значение коэффициента К. Хайдарова по формулам таблицы 2	Значение коэффициента К. Хайдарова по экспериментальным данным [6]	Отклонение расчётных значений относительно экспериментальных, в %
1	69,425	69,683	- 0,370
2	34,7125	36,199	- 4,106
5	13,885	13,575	+2,233
7	9,91786	9,955	- 0,373
10	6,9425	6,787	+2,240
14	4,95893	4,842	+2,358
20	3,47125	3,484	- 0,366
28	2,47946	2,561	- 3,184
35	1,98357	1,959	+1,239
50	1,44444	1,439	+0,377
70	1,14512	1,14	+0,448
100	1,02778	1,027	+0,076
150	1	1	±0,000

Получение более точных расчётных формул требует проведения дополнительных экспериментальных исследований и их многократного дублирования несколькими независимыми друг от друга экспериментаторами, а также перекрёстного сравнения полученных данных и оценкой их, например, по критерию Стьюдента [7, стр. 253-256].

Такие исследования будут весьма важны для решения задачи резонансной передачи электрической энергии, поскольку от решения вопроса точного определения длины четверть-волнового отрезка резонансной линии зависят

практически все остальные параметры резонансных линий. В конечном счёте, от решения вопроса точного определения длины четверть-волнового отрезка резонансной линии зависит и получение решающего экономического эффекта данной инновационной технологии за счёт её уникальной возможности высокотемпературной резонансной электрической сверхпроводимости.

### Список литературы

1. Стребков Д.С., Некрасов А.И. Резонансные методы получения, передачи и применения электрической энергии. Изд. 6-е, перераб. и доп. – М.: ФБГНУ ФНАЦ ВИМ, 2018. - 572 с.

2. Быковский А.А., Андреев М.В. Резонансные системы передачи электрической энергии. Принцип работы, возможности, недостатки и перспективы внедрения // Актуальные теории, концепции, прикладной характер современных научных исследований: сборник научных статей по итогам Международной научно-практической конференции. 30-31 мая 2019 года. Санкт-Петербург. –СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2019. – 241 с.

3. Ефимов И.Е., Останькович Г.А. Радиочастотные линии передачи. Радиочастотные кабели. Изд. 2-е перераб. и доп. М., «Связь», 1977.

4. Заев Н. «Сверхпроводник» инженера Авраменко // «Техника – молодёжи», №1, 1991.

5. Машковцев И.И. Однопроводная и беспроводная передачи энергии [Электронный ресурс]: <https://ww.youtu.be/g3UKe15rqKs> [Дата обращения: 08.02.2021].

6. Хайдаров К.А. О скорости электромагнитных волн [Электронный ресурс]: [www.bourabai.kz/velocity.htm](http://www.bourabai.kz/velocity.htm) [Дата обращения: 08.02.2021].

7. Х. Шенк. Теория инженерного эксперимента. М.: «Мир», 1972, перевод с английского, 382 с.