

УДК 537.856

## РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ СКИН-СЛОЯ РЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ

Хахалев С.Г., студент гр. МЭС - 201, II курс

Научный руководитель: Семернин А.Н., к.т.н., доцент

Белгородский государственный технологический университет

имени В.Г. Шухова

г. Белгород

Беспроводное зарядное устройство - это технология, обеспечивающая передачу электромагнитной энергии по воздуху от источника к приемнику без использования проводных соединений. Она применима для самых разнообразных устройств, от маломощной электрической зубной щетки до электромобилей, и обладает несомненным преимуществом в удобстве использования. В настоящее время данная технология находит все более широкое применение, воплощаясь в коммерческих продуктах. [1]

Технологии беспроводной зарядки делятся на неизлучающие, работа которых основана на эффекте магнитной индукции, и излучающие, которые используют энергию электромагнитных волн.

Наибольшее распространение среди технологий передачи электроэнергии без проводов получили два метода: магнитная индуктивная связь и магнитно-резонансная связь. Подробное описание данных методов представлено в статье «Разработка беспроводного зарядного устройства». [2]

Беспроводная передача электроэнергии с помощью этих методов осуществляется в переменном магнитном поле высокой частоты. При этом в обмотках высокочастотного трансформатора, возникают вихревые токи. В результате протекания данных токов часть электромагнитной энергии преобразуется в тепло. Это приводит к уменьшению напряженности электрического и магнитного полей и плотности тока в центре проводящей среды. Это явление носит название скин-эффект.

Скин-эффект - эффект снижения амплитуды электромагнитных волн по мере их проникновения в глубь проводника. Скин-эффект характеризуется величиной скин-слоя. Толщина скин-слоя определяется по формуле:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu \pi f}}, \quad (1)$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление проводника;

$\mu$  - абсолютная магнитная проницаемость;

$f$  - частота переменного тока.

Из формулы следует, что глубина скин-слоя зависит от частоты переменного тока и материала проводника. В данной работе используется метод, состоящий в экспериментальном определении активного сопротивления проводника переменному току различной частоты. Проводник свернут в плоскую спиральную катушку, индуктивность которой  $0,02 \text{ мГн}$ , диаметр провода  $0,25 \text{ мм}$ . Резистор  $R_{\text{доп}}$  обеспечивает постоянство амплитуды тока через контур при изменении частоты в области резонанса. Параллельно этой катушке подключен конденсатор емкостью  $C = 0,1 \text{ мкФ}$ . Данный колебательный контур подключен к генератору высокочастотного синусоидального напряжения  $U_g = 5 \text{ В}$  (рис. 1).

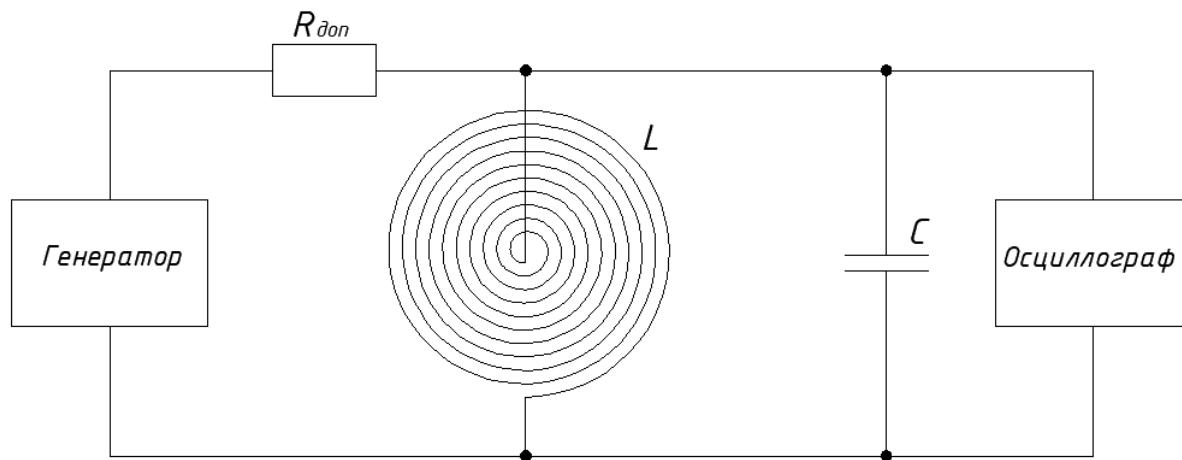


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

При совпадении частоты напряжения, подаваемого на контур, с собственной частотой наблюдается резонанс токов. Токи, протекающие в индуктивной и емкостной ветвях контура становятся наибольшими и противоположными друг другу по фазе. При этом напряжение на контуре оказывается наибольшим. [3]

Добротность контура связана с его параметрами следующим образом:

$$Q = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (2)$$

где  $R$  - полное сопротивление, учитывающее все потери энергии в контуре.

Активное сопротивление катушки индуктивности на переменном токе определяется по формуле:

$$R_L = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \frac{1}{Q} \quad (3)$$

Добротность контура будем определять по ширине его резонансной кривой:

$$Q = \frac{f_{\text{рез}}}{\Delta f}, \quad (4)$$

где  $f_{\text{рез}}$  - резонансная частота контура;

$\Delta f = f_1 - f_2$  - ширина резонансной кривой на уровне  $0,7U_{\text{рез}}$  (частоты  $f_1$  и  $f_2$  соответствуют  $U_{1,2}$  на уровне  $0,7U_{\text{рез}}$  по обе стороны от максимального значения).

Частота резонанса определяется путем изменения частоты подаваемой на колебательный контур. Изменение частоты происходит до тех пор, пока напряжение на колебательном контуре будет наибольшим. На рис. 2 представлена осцилограмма напряжения на колебательном контуре.

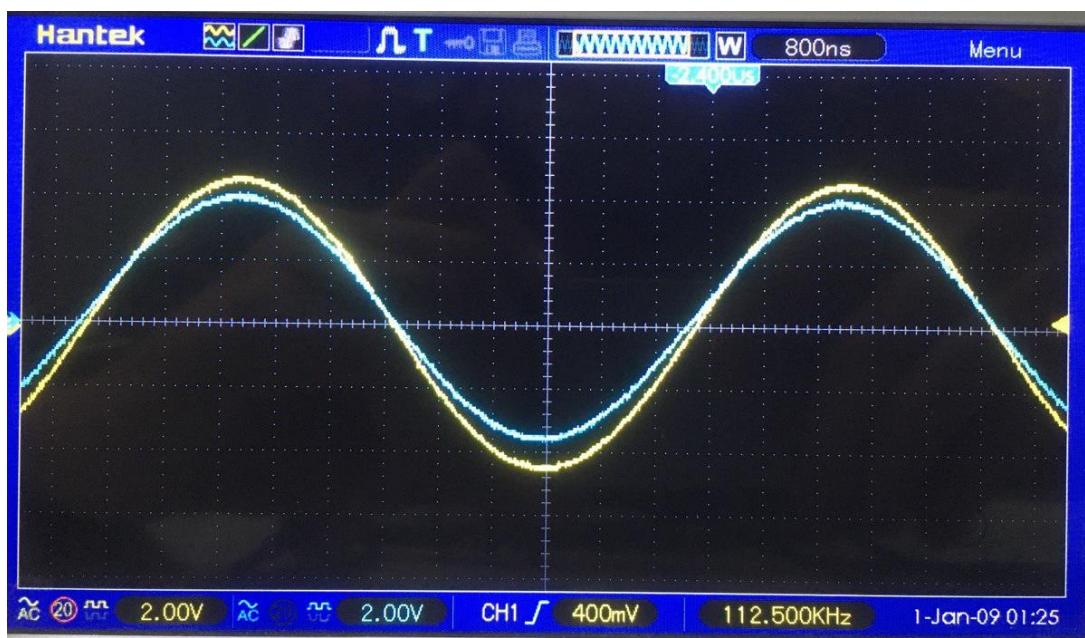


Рис. 2. Осцилограмма напряжения на колебательном контуре при резонансной частоте

Как видно на осцилограмме (рис. 2) частота резонанса равна 112,5 кГц. Осцилограммы напряжения на контуре при  $0,7U_{\text{рез}}$  представлены на рис. 3 - 4.



Рис. 3. Осциллографма напряжения на колебательном контуре  $0,7U_{\text{рез}}$

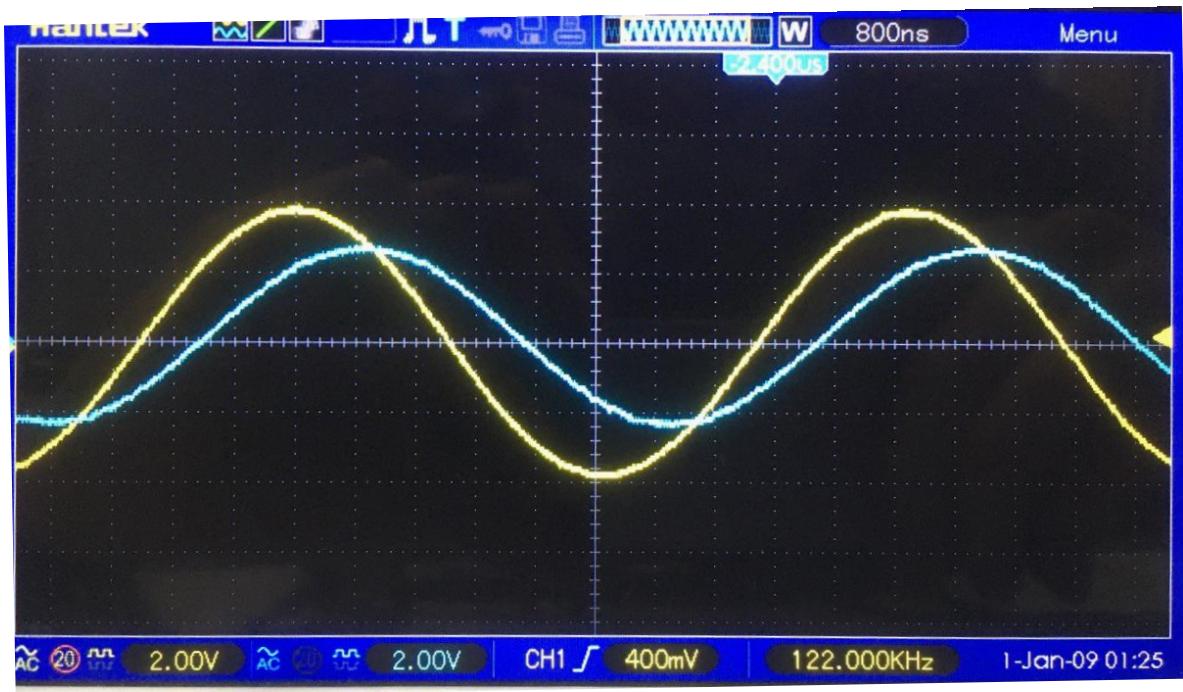


Рис. 4. Осциллографма напряжения на колебательном контуре  $1,3U_{\text{рез}}$

По осциллографмам были получены значения  $f_1$  и  $f_2$  при  $0,7U_{\text{рез}}$  и  $1,3U_{\text{рез}}$  в результате были получены следующие значения частот  $f_1 = 104,6$  кГц и  $f_2 = 122$  кГц. Далее определяются сопротивление провода и сопротивление катушки индуктивности, а также толщина скин-слоя.

Расчет толщины скин-слоя на основе экспериментальных данных осуществляется по формуле:

$$\delta = \frac{r_{np}}{2} \cdot \frac{R_{np}}{R_L}, \quad (5)$$

где  $r_{np}$  - радиус провода из которого намотана катушка;

$R_{np}$  - сопротивление провода;

$R_L$  - сопротивление катушки индуктивности.

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

*Таблица 1*

### **Результаты эксперимента**

$R_{np}$ , Ом	$\Delta f$ , кГц	Q	$R_L$ , Ом	$\delta$ , мм
7,14	17,40	6,47	2,19	0,203

Выполним расчет толщины скин-слоя по формуле (1):

$$\delta = \sqrt{\frac{0,0175}{1,256 \cdot 10^{-6} \cdot \pi \cdot 112,5 \cdot 10^3}} = 0,199 \text{ мм.}$$

Определим погрешность результатов толщины скин-слоя полученной в результате эксперимента с табличным значением, рассчитанным по формуле (1).

Погрешность результатов эксперимента:

$$\varepsilon = \frac{0,203 - 0,199}{0,199} \cdot 100\% = 2\%.$$

По результатам проведенного эксперимента можно сделать вывод о целесообразности применения резонансного метода для определения толщины скин-слоя проводника, что подтверждает высокая точность данного метода ( $\varepsilon = 2\%$ ).

### **Список литературы**

1. Xiao Lu, Ping Wang, Niyato Dusit, Dong In Kim, Zhu Han. Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications // IEEE Communications Surveys & Tutorials. Vol. 18. Pp. 1413 - 1452.
2. Хахалев, С. Г. Разработка беспроводного зарядного устройства / С. Г. Хахалев // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова : Материалы конференции, Белгород, 30 апреля – 20 2021 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 4285-4289.
3. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. М.: Наука, 2005.