

УДК 537.874.4

И.А. Черепнев<sup>1</sup>, Г.В. Фесенко<sup>2</sup>, А.В. Артюшенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко, Харьков

<sup>2</sup> Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, Харьков

<sup>3</sup> Факультет военной подготовки Национального технического университета «Харьковский политехнический институт, Харьков

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТЕСЛА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ТЕРАПИИ

Предложена система формирования широкополосного электромагнитного поля продольной поляризации для эффективной электромагнитной терапии на основе импульсного трансформатора Тесла. Приведены аналитические выражения для расчета установки. Рассчитаны пространственные распределения всех полей вблизи установки.

**Ключевые слова:** импульсный трансформатор Тесла, продольная поляризация, электромагнитное поле, электромагнитная терапия.

### Введение

**Постановка проблемы.** Успешное развитие электромагнитной терапии (ЭМТ) прямо связано с разнообразием эффективных источников электромагнитных полей для терапевтических целей, удовлетворяющих как требованию обеспечения эффективности воздействия на биологические объекты, так и требованию оптимальной доставки до необходимой области объекта терапии.

Как показано в [1], эффективность воздействия возрастает с ростом ширины полосы сигнала, а как показано в [2], необходимыми свойствами по проникновению вглубь организма обладают волны продольной поляризации. Интересно, что обоим требованиям удовлетворяют системы на основе трансформатора Тесла [3, 4].

**Анализ последних исследований и публикаций.** В большинстве работ по трансформатору Тесла обращается внимание на его работу в приближении индукционного взаимодействия двух контуров с сосредоточенными параметрами в резонансном режиме. Однако, в конструкциях трансформаторов Тесла предусмотрено использование его вторичной обмотки, как спиральной распределенной системы, способной формировать электромагнитные поля с продольной поляризацией. Антенные системы, способные формировать продольные компоненты, приведены в [5] и [6].

В настоящей работе приведены расчеты электромагнитных полей трансформатора Тесла, которые позволяют разрабатывать системы ЭМТ.

### Изложение основного материала

Проведем расчет полей трансформатора Тесла. Для синтеза оптимальной структуры источника

важно учитывать особенность резонансных систем, которая связана с зависимостью реактивностей цепей (их электромагнитной инерционности при различных расстояниях до резонанса) от текущей частоты внешнего сигнала.

Один из простейших способов вычисления индуктивности основан на вычислении энергии всех компонент ЭМ поля электрофизической системы. Еще в работах Фока, Подольского и Дирака [7 – 8] было показано, что обычный лагранжиан для электромагнитного поля и заряженных частиц должен быть обобщен:

$$L_{EH} = \frac{1}{2}(\vec{E}^2 - \vec{H}^2) - W_{FP}^2 + \vec{j}\vec{A} - \rho\phi. \quad (1)$$

Здесь  $W_{FP} = \frac{1}{\mu} \operatorname{div}(\vec{A}) + \varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial t}$  – потенциал про-

дольных электромагнитных полей Фока – Подольского, который последнее время привлекает большое внимание [9 – 11]. С учетом этой функции плотность энергии магнитного поля:

$$\rho_H = \frac{\mu}{2}(\vec{H}^2 + W_{FP}^2), \quad \varepsilon_H = \int_{\Omega} \rho_H d\Omega. \quad (2)$$

Индуктивность системы при этом определяется при представлении энергии поля в виде  $\varepsilon_H = \frac{LI^2}{2}$ .

Интегрируя по всему пространству и пользуясь отсутствием потока вектора Пойнтинга через поверхность бесконечно большого радиуса, получим

$$\varepsilon_H = \frac{LI^2}{2} = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \vec{j}\vec{A} d\Omega, \quad (3)$$

где интеграл в правой части берется по объему системы, а векторный потенциал имеет не только поперечные, но и продольные компоненты. Откуда:

$$L = \frac{1}{I^2} \iint_{\Omega} \frac{\vec{j}(\vec{r}) \vec{j}(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d\Omega d\Omega'. \quad (4)$$

Среди различных замедляющих структур одной из эффективных является спиральная замедляющая структура (спиральный резонатор), представляющая собой длинную по сравнению с длиной волны катушку индуктивности (катушку Тесла). Замедление волны в спиральной структуре происходит из-за того, что волна распространяясь вдоль провода, проходит путь, сдвигаясь вдоль оси на шаг намотки за время пробега длины одного витка. В том случае, когда соотношение очень мало, происходит существенное замедление волны в осевом направлении.

Катушка Тесла является распределенной колебательной системой с формально бесконечным числом резонансных частот. Среди этого множества частот есть частоты, обеспечивающие резонатору наибольшую добротность.

С продольной постоянной распространения  $\tau$  связана фазовая скорость волны вдоль катушки  $u_{ph}$  и коэффициент замедления волны  $V_f$ , которые определяются следующим образом:

$$u_{ph} = cV_f = \frac{\omega}{\beta}, \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda_g}, \quad \lambda_g = V_f \lambda_0. \quad (5)$$

Теперь, воспользовавшись определением продольной постоянной распространения  $\tau^2 = \beta^2 - k^2$ , можно связать  $\tau$  с коэффициентом замедления  $V_f$ :

$$\tau^2 = k^2 \left( \frac{c^2}{u_{ph}^2} - 1 \right) = k^2 \left( \frac{1}{V_f^2} - 1 \right) \text{ или } V_f = 1 / \sqrt{1 + \frac{\tau^2}{k^2}}.$$

Воспользовавшись этим соотношением и приближенным решением для постоянной распространения  $\tau$  можно для катушки Тесла с ошибкой менее 10% записать простое соотношение для замедления волны:

$$V_f = \frac{1}{\sqrt{1 + 20 \left( \frac{D}{s} \right)^{2.5} \left( \frac{D}{\lambda_0} \right)^{0.5}}}, \quad D = 2a. \quad (6)$$

Таким образом, распределение потенциала и тока вдоль оси системы можно записать в виде:

$$U(z) = U_{max} \cos\left(\frac{\pi z}{2h}\right), \quad I(z) = I_{max} \sin\left(\frac{\pi z}{2h}\right), \\ I_{max} = U_{max} / Z_c. \quad (7)$$

Здесь использовано обозначение  $h = \frac{1}{4} \lambda_g$ , а волновое сопротивление  $Z_c$  катушки Тесла – спирального резонатора дается выражением:

$$Z_c = \frac{60}{V_f} I_0(\tau a) K_0(\tau a). \quad (8)$$

Вблизи резонанса из (8) при  $\tau \approx 2\pi/\beta$  приближенно получаем:

$$Z_c = \frac{60}{V_f} \log\left(\frac{0.368\lambda_g}{D}\right). \quad (9)$$

Ток вдоль системы сдвинут по фазе на 90 градусов от напряжения и максимален в области возбуждения волны (в области, где напряжение близко к нулю). В этой области к системе подсоединена «земля», а ток максимален. Наоборот, в области максимума напряжения ток достигает минимума. Амплитуда напряжения на нагрузке  $U_{max}$  превышает входящее напряжение  $U_0$  на величину коэффициента стоячей волны по напряжению:

$$U_{max} \approx \frac{Z_c}{Z_0} U_0. \quad (10)$$

Если между максимумом и минимумом в точке  $z_{sc}$  (фаза  $\beta \cdot z_{sc}/h \approx \pi/4$ ) поменять направление обмотки, то в этой области амплитуды тока и напряжения будут иметь среднюю величину, поперечное магнитное поле компенсируется и будет максимальна амплитуда продольного скалярного магнитного поля.

Отличие от напряженностей магнитного и электрического полей, которые синфазны, векторные поля и скалярные поля изменяются в противофазе с напряженностями поперечных электромагнитных полей – в моменты исчезновения поперечных полей продольные компоненты достигают максимума в соответствии с решением обобщенных уравнений Максвелла, то есть максимум потенциала Фока-Подольского, сосредоточен в области минимального магнитного поля.

Электромагнитные поля формируют потоки плотности электромагнитной энергии, величина и направления которых определяются обычными компонентами поля в виде вектора Пойнтинга, направленного поперек напряженностей полей  $\vec{S}_t = \vec{E} \times \vec{H}$ . Потенциальные, продольные поля формируют дополнительные потоки энергии вдоль напряженностей электрического и магнитных полей:  $\vec{S}_l = H_p \vec{E} + E_p \vec{H}$ . Магнитное поле связано с потенциалами соотношением  $\mu \vec{H} = \text{rot}(\vec{A})$ , из которого можно получить выражение для векторного потенциала, воспользовавшись выражением ротора в цилиндрических координатах. После этого решение для компонент векторного потенциала:

$$A_r = \left( -\frac{E_{amp}}{2} \frac{\omega}{c^2 \beta \tau} \right) \cos(\beta z) \begin{cases} I_1(\tau r), & r \leq a \\ -\frac{I_0(\tau a)}{K_0(\tau a)} K_1(\tau r), & r > a \end{cases} \quad (11)$$

$$A_z = \left( -\frac{E_{amp}}{2} \frac{\omega}{c^2 \tau^2} \right) \sin(\beta z) \begin{cases} I_0(\tau r), & r \leq a \\ \frac{I_0(\tau a)}{K_0(\tau a)} K_0(\tau r), & r > a \end{cases}$$

Возвращаясь к обмотке со сменой направления получаем следующие выражения для ненулевых компонент векторного потенциала:

$$A_r = \left( -\frac{E_{amp}}{2} \frac{\omega}{c^2 \beta \tau} \right) \cos(\beta z) \cdot \text{Tanh} \left( -\beta \frac{(z-z_p)}{\sigma_p} \right) \begin{cases} I_1(\tau r), & r \leq a \\ \left( -\frac{I_0(\tau a)}{K_0(\tau a)} \right) K_1(\tau r), & r > a \end{cases} \quad (12)$$

$$A_z = \left( -\frac{E_{amp}}{2} \frac{\omega}{c^2 \tau^2} \right) \sin(\beta z) \cdot \text{Tanh} \left( -\beta \frac{(z-z_p)}{\sigma_p} \right) \begin{cases} I_0(\tau r), & r \leq a \\ \left( \frac{I_0(\tau a)}{K_0(\tau a)} \right) K_0(\tau r), & r > a \end{cases}$$

Вычислим вклад в соответствующие напряженности электрического поля от нестационарности векторного потенциала

$$E_r^A = -\frac{\partial A_r}{\partial t}, \quad E_z^A = -\frac{\partial A_z}{\partial t} \quad (13)$$

Вычислив дивергенцию векторного потенциала  $\text{div}(\vec{A})$  получаем величину скалярного магнитного поля, воспользовавшись формальным решением уравнения Максвелла, из которого следуют эффективная плотность заряда  $\rho_{eff} = \epsilon \mu \frac{\partial W_{FP}}{\partial t}$  в вакууме и плотность тока  $\vec{j}_{eff} = \text{grad}(W_{FP})$  за счет градиента скалярного магнитного поля.

Приведем типичные значения величин в оптимизируемой установке для шага спирали катушки Тесла 0,01 см, диаметра катушки Тесла 7,5 см и амплитуды разности потенциалов в первичном контуре  $U_0 = 100$  В с частотой  $f_0 \approx 470$  кГц.

Спиральную структуру Тесла можно эффективно возбуждать последовательностью однополярных импульсов. При таком возбуждении можно управлять спектром возникающих в спиральном резонаторе высоковольтных радиоимпульсов. На рис. 1 показаны типичные радиоимпульсы.

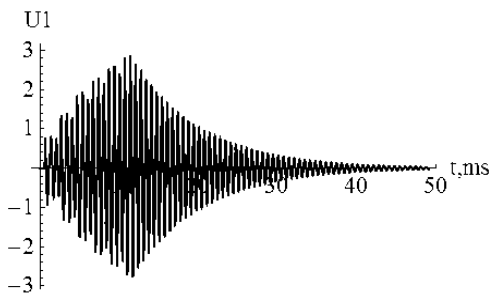


Рис. 1. Один радиоимпульс, возбуждаемый одной последовательностью импульсов

Распределение в пространстве скалярного магнитного поля и эффективного тока показано на рис. 2, 3.

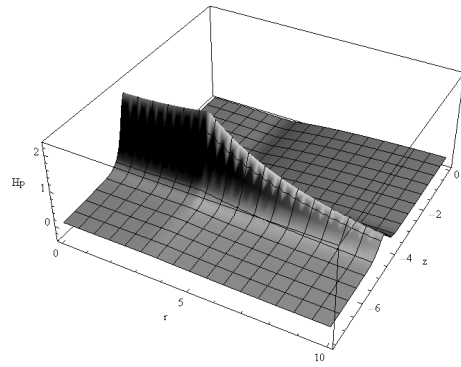


Рис. 2. Распределение в пространстве плотности флуктуаций заряда в области минимума магнитного поля

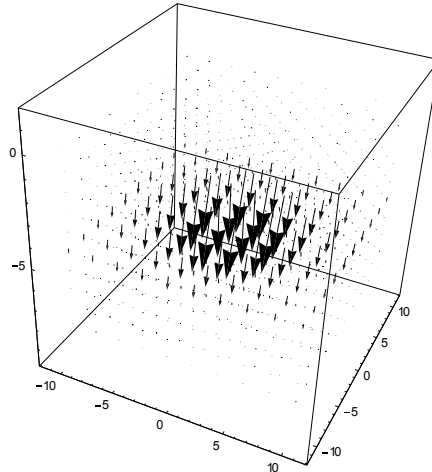


Рис. 3. Распределение в пространстве плотности флуктуаций заряда и эффективного продольного тока смещения в области минимума магнитного поля

Таким образом, расчетами полей подтвержден факт создания на участках минимума магнитного поля, области виртуального конденсатора с большой плотностью потенциала Фока-Подольского и электрических полей с продольной поляризацией.

Нагрузка, представляющая какой-либо комплексный импеданс, организует в линии смешанный режим со стоячей волной и находится фактически между предельными случаями. Для разомкнутой линии каждой емкости  $C$  на данной частоте можно поставить в соответствие отрезок разомкнутой линии длиной меньше  $\lambda_g / 4$ . Емкость  $C$  имеет емкостное сопротивление  $Z_C = i \frac{1}{\omega C}$ .

Приравняем величину этого сопротивления к входному сопротивлению разомкнутой линии длиной меньше  $\lambda_g / 4$ :  $-i \frac{1}{\omega C} = -i \rho_w \text{ctg}(\beta_g l)$  и найдем длину линии  $l$ , эквивалентную по входному сопротивлению емкости  $C$ :

$$l = \frac{1}{\beta_g} \text{Arctg}(\omega C \rho_w) \quad (14)$$

При изменении емкости эпюры сдвигаются вдоль оси  $z$ . В частности, при увеличении емкости

емкостное сопротивление уменьшается, напряжение на емкости падает, и все эпюры сдвигаются вправо, приближаясь к эпюрам, соответствующим короткозамкнутой линии. При уменьшении емкости эпюры сдвигаются влево, приближаясь к эпюрам, соответствующим разомкнутой линии.

Для замкнутой линии, каждой индуктивности  $L$  на данной частоте  $\omega$  можно поставить в соответствие отрезок замкнутой линии длиной меньше  $\lambda_g/4$ . Индуктивность  $L$  имеет импеданс  $Z_L = i\omega L$ . Приравняв это сопротивление к входному сопротивлению замкнутой линии длиной  $l < \lambda_g/4$ :  $i\omega L = i\rho_w \operatorname{tg}(\beta_g l)$  и найдем длину линии  $l$ , эквивалентную по входному сопротивлению индуктивности  $L$ :

$$l = \frac{1}{\beta_g} \operatorname{Arctg} \left( \frac{\omega L}{\rho_w} \right). \quad (15)$$

Изменение индуктивности приводит к сдвигу эпюр вдоль оси  $z$ : с увеличением  $L$  эпюры сдвигаются вправо, приближаясь к эпюрам холостого хода; с уменьшением  $L$  – влево по оси  $z$ , стремясь к эпюрам короткого замыкания.

## Выводы

Подводя итог можно сказать, что спиральная структура Тесла может быть как источником колебаний напряженности электрического поля, так и эффективным источником потенциалов Фока-Подольского и соответствующих электромагнитных полей продольной поляризации в областях минимума магнитного поля при возбуждении в спиральной структуре ее собственных колебаний.

Предложенная схема позволяет при использовании источников управляемой последовательности импульсов эффективно согласовать генерируемые импульсы с антенной системой с высокой симметрией и эффективной компенсации поперечных магнитных полей. При этом с использованием установки одновременно увеличивается эффективность и размер области, подвергающейся терапии.

## Список литературы

1. Черепнев И.А. Изучение влияния электромагнитных полей на развитие воспалительных процессов живых организмов на основе неравновесной термодинамики / И.А. Черепнев, А.Н. Мороз // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». «Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов». – 2011. – Вып. 12. – С. 163-168.
2. Черепнев И.А. Возможности тороидальных антенн для повышения эффективности терапевтического воздействия миллиметрового излучения / И.А. Черепнев, Г.А. Ляшенко // Энергетика та комп'ютерно-інтегровані системи в АПК. – 2014. – Вып. 2(2). – С. 46-48.
3. Вдовин С.С. Проектирование импульсных трансформаторов / С.С. Вдовин. – Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 208 с.
4. Мегель Ю.Е. Использование импульсного трансформатора для эффективной связи источника коротких импульсов и антенны / Ю.Е. Мегель, А.В. Артюшенко // Системи обробки інформації. – X.: XV ПС, 2012. – Вып. 3(101). – С. 91-93.
5. Monstein C. Observation of scalar longitudinal electrodynamic waves / C. Monstein, J.P. Wesley // Europhys. Lett. – 2001. – №59(4). – P. 199-205.
6. Черепнев И.А. Концепция воздействия импульсного электромагнитного поля на биологические объекты // Збірник наук. праць Харківського університету Повітряних Сил. – X., 2007. – Вып. 3(15). – С. 52-54.
7. Fock V. On the quantization of electromagnetic waves and interfection of charges on Diracs theory / V. Fock, B. Podolsky // Sow. Phys. – 1932. – V.1. – 801 p.
8. Dirac P.A.M. On quantum electrodynamics / P.A.M. Dirac, V. Fock, B. Podolsky // Phys. Zeitschr. der Sowjetunion 2. – 1932. – 468 p.
9. Дубровский В.А. Упругая модель физического вакуума / В.А. Дубровский // Доклады АН СССР. – 1985. – Т.282. – №1. – С. 83-88.
10. Woodside D. Three-vector and scalar field ideties and uniqueness theorem in Euclidean and Minkowski spaces / D. Woodside // Am.J. Phys. – 2009. – V.77. – №5. – P. 438-446.
11. Podgainy D.V. Nonrelativistic theory of electro-scalar field and Maxwell electrodynamics / D.V. Podgainy, O.A. Zaimidoroga // arXiv:1005.3130, 18 May. – 2010.

Поступила в редколлегию 28.10.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ВИКОРИСТАННЯ ІМПУЛЬСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТЕСЛА ДЛЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ТЕРАПІЇ

І.А. Черепньов, Г.В. Фесенко, О.В. Артюшенко

Запропоновано систему формування широкопasmового електромагнітного поля поздовжньої поляризації для ефективної електромагнітної терапії на основі імпульсного трансформатора Тесла. Наведено аналітичні вирази для розрахунку установки. Розраховані просторові розподіли всіх полів поблизу установки.

**Ключові слова:** імпульсний трансформатор Тесла, поздовжня поляризація, електромагнітне поле, електромагнітна терапія.

## TESLA PULSE TRANSFORMER USING FOR AN ELECTROMAGNETIC THERAPY

I.A. Cherepnev, G.V. Fesenko, O.V. Artyushenko

The system of formation of the electromagnetic field of broadband longitudinal polarization for effective therapy based on electromagnetic Tesla pulse transformer is proposed. The analytical expressions for the calculation of the installation are given. The spatial distribution of all fields near the installation is estimated.

**Keywords:** Tesla pulse transformer, longitudinal polarization, electromagnetic field, electromagnetic therapy.