

Ю. В. БАТЫГИН, Е. А. ЧАПЛЫГИН, С. А. ШИНДЕРУК, О. С. САБОКАРЬ

РЕЗОНАНС ВО ВТОРИЧНОМ КОНТУРЕ ТРАНСФОРМАТОРА ТЕСЛА ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ГАРМОНИЧЕСКИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Из залученням математичного апарату теорії електричних ланцюгів без будь-яких гіпотез про будову матеріального світу проаналізовано процеси збудження вторинного контуру трансформатора Тесла гармонійним сигналом в умовах його максимальної ефективності. Визначено кількісні показники дієвості трансформатора в порівнянні з якісними рекомендаціями великого винахідника. Показано, що при резонансі у вторинній обмотці збуджується електрична рушійна сила, що багаторазово перевищує амплітуду, обумовлену індуктивним зв'язком обмоток трансформатора.

Ключові слова: трансформатор Тесла, резонанс, коефіцієнт перетворення енергії, резонансний контур.

С привлечением математического аппарата теории электрических цепей без каких-либо гипотез о строении материального мира проанализированы процессы возбуждения вторичного контура трансформатора Тесла гармоническим сигналом в условиях его максимальной эффективности. Определены количественные показатели действенности трансформатора в сравнении с качественными рекомендациями великого изобретателя. Показано, что при резонансе во вторичной обмотке возбуждается электрическая движущая сила, многократно превышающая амплитуду, обусловленную индуктивной связью обмоток трансформатора.

Ключевые слова: трансформатор Тесла, резонанс, коэффициент преобразования энергии, резонансний контур.

In the paper electromagnetic processes of resonant excitation of the secondary circuit of the Tesla transformer by a harmonic signal under conditions of the maximum voltage conversion efficiency are theoretically analyzed. The quantitative indicators of the transformer effectiveness in comparison with the qualitative recommendations of the great inventor are determined. It is shown that at the resonance in the secondary circuit an electromotive force is excited which exceeds the amplitude conditioned by the inductive coupling of the transformer coils. The integral voltage conversion coefficient obtained is proportional to the Q-factor of the secondary circuit, which is consistent with the Tesla's phenomenological statement that the Q-factor of the transformer secondary circuit and the voltage excited at its output are correlated. It is shown that the voltage conversion under resonance excitation and sufficiently large Q-factor of the secondary circuit occurs with efficiency much higher than the conversion at the expense of the inductive coupling between the primary and secondary circuits of the Tesla transformer.

Key words: Tesla transformer, resonance, coefficient of energy conversion, resonant circuit.

Введение. 22 сентября 1896 года *Никола Тесла* получил патент США на «Аппарат для производства электрических токов высокой частоты и потенциала». Предложение автора было реализовано с помощью устройства, получившего в специальной литературе название *трансформатора Тесла* [1].

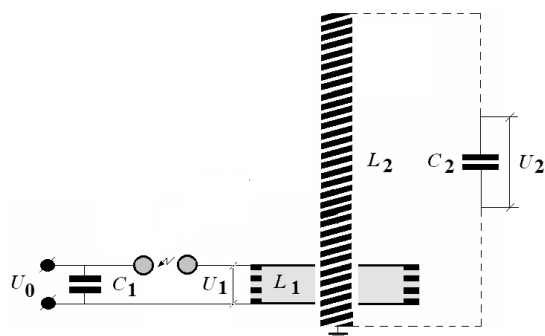


Рис. 1 – Простейшая иллюстративная схема трансформатора Тесла: L_1C_1 – первичный контур; L_2C_2 – вторичный контур; $U_{1,2}$ – напряжения на первичной и вторичной обмотках, соответственно.

Принцип его действия (рис. 1) был достаточно прост [1 – 3]. Предварительно заряженный конденсатор C_1 разряжается в цепи первичной обмотки L_1 , которая содержит несколько витков провода большого сечения. Временная форма разряда – гармоническая зависимость. Вторичная обмотка L_2 , в свою очередь, содержит значительно большее число витков из провода меньшего диаметра, причем лишь малая часть вторичной обмотки индуктивно связана с первичной, в то время, как остальная часть вторичной обмотки выступает в роли независимой индуктивности. Вторичный контур не замкнут и протекание тока в нём обусловлено наличием эквивалентной распределённой ёмкости C_2 между высоковольтным и заземлённым выводом вторичной обмотки.

Отличительной особенностью трансформатора Тесла является необычайно высокий коэффициент преобразования напряжения ($k > 1000$), намного превышающий его величину, обусловленную индуктивной связью между обмотками.

Согласно мнению великого учёного, данный факт объясняется извлечением дополнительной энергии из внешней субстанции, пронизывающей всё окружающее пространство и названной *эфиром*. Н. Тесла считал, что мы «купаемся в море энергии эфира», потоки которой это, в частности, и потоки электричества [1].

Точка зрения великого учёного получила поддержку и в современных научных работах, например [4 – 7], где предложены различные гипотезы и показано, что получение дополнительной (*радиантной* [5, 6] или *свободной* [7, 8]) энергии из окружающего пространства не противоречит законам сохранения, потому что энергия, как непреходящая субстанция материального мира, нигде и никогда не исчезает и не появляется. Она просто трансформируется из одного вида в другой [6, 7]. Попытки перейти от теории к практике, и создать реальные устройства для извлечения энергии из окружающего пространства, описаны разными авторами [4, 5, 10, 11]. И хотя, как следует из открытых публикаций, говорить о действительных успехах в этом направлении ещё рано, но,

безусловно, можно считать, что практические возможности трансформатора Тесла, как преобразователя энергии, далеко не исчерпаны известными и малозначащими практическими приложениями [8, 9].

В этой связи продолжение поисковых работ представляется достаточно актуальным. И здесь, в первую очередь, необходимо развитие адекватных физико-математических моделей, на базе которых можно описать процессы, происходящие в трансформаторе Тесла, в терминах рекомендаций его автора. Успешность этих работ позволит перейти от «устройства генерирования тока высокой частоты при очень высоком выходном напряжении, но весьма малой интенсивности [12]», к созданию, по крайней мере, реального усилителя мощности электрических сигналов.

Анализ последних исследований. Сразу следует отметить, что в современной научной периодике встречается достаточно много публикаций, посвящённых трансформатору Тесла. В представленном списке литературы выбраны основные работы, где помимо собственного предмета исследований имеются достаточно обширные обзорные материалы, охватывающие практически всё, что было наработано учёными, инженерами и конструкторами до настоящего времени.

Вначале идёт общая характеристика публикаций и выделение основных направлений с соответствующими результатами проведенных исследований.

Первые, – это работы, посвящённые резонансным эффектам с определением рабочих частот и возбуждаемым напряжениям [12 – 14, 19, 20, 23]. Вторые, – это исследования, направленные на повышение эффективности процессов генерирования высоковольтных сигналов. Здесь расчёты и измерения пространственно-временного распределения электрического поля вдоль вторичной обмотки трансформатора, определение характеристик электромагнитной связи между обмотками, наконец, подавление высших типов колебаний в спектре возбуждаемого напряжения [15 – 17]. Третьи, – это конструкторские решения, конкретные проекты и описание полученных показателей действенности выполненных разработок [16, 18 – 23].

Следует отметить, что разделение цитируемых работ по направлениям исследований является весьма условным, поскольку в каждой из них в большей или меньшей степени присутствуют все аспекты указанных проблем по трансформатору Тесла.

Оставим конструкции вне проводимого рассмотрения и сконцентрируем внимание на результатах, представляющих наибольший интерес как предмет дальнейшего развития в рамках настоящей работы.

Так, нельзя согласиться с исходной физической предпосылкой о влиянии вторичного тока на процессы возбуждения первичного контура трансформатора при исследовании резонансных эффектов. Фактически, цепь вторичного контура замкнута распределённой ёмкостью. Протекающий ток крайне незначителен, и его влияние на энергообмен между обмотками не может быть существенным. Этот вывод подтверждается достаточно малым коэффициентом электромагнитной связи между обмотками и, соответственно, возбуждением вторичного контура на *антирезонансной частоте*, практически равной частоте резонанса. То есть, в терминах классической электротехники трансформатор Тесла работает в режиме холостого хода [24, 25].

В большинстве цитируемых работ ёмкость вторичного контура рассматривается как паразитный параметр межвитковой электрической связи, и все вычисления выполнены в пренебрежении распределённой ёмкостью, зависящей от окружения вторичной обмотки. В этой связи результаты расчётов рабочих частот, пространственно-временного распределения возбуждаемого напряжения вдоль катушки вторичного контура, влияния взаимной индуктивности обмоток и вклада высших мод на временную форму выходного сигнала представляются достаточно сомнительными.

Не выдерживают критики вычисления возбуждаемого напряжения с помощью закона сохранения энергии, поскольку в этом случае отсутствует резонансный фактор необычайно высокого роста коэффициента преобразования напряжения.

Заканчивая обзор цитируемых работ, следует отметить, что, по мнению авторов [15], все выше представленные подходы к описанию процессов в трансформаторе Тесла не дали убедительных результатов.

В целом, как следует из проведенного анализа, многочисленные научные публикации содержат лишь фрагментарные вычисления и не содержат последовательной «замкнутой» теории резонансных электромагнитных процессов в трансформаторе Тесла. Как следствие, и это главное, отсутствуют попытки согласования с фундаментальными рекомендациями Николы Тесла, обеспечивающими достижение максимума эффективности преобразования напряжения. Основные из них перечислены ниже [1]:

- резонансное возбуждение вторичного контура;
- добротность вторичного контура – $Q_2 = \omega L_2 / R_2$ должна быть достаточно большой, то есть, $Q_2 \gg 1$;
- Q_1 – добротность первичного контура должна быть достаточно малой, то есть $Q_1 \ll Q_2$;
- величина энергии, снимаемой в нагрузку, должна быть намного меньше энергии, генерируемой вторичным контуром (≤ 1 %).

Постановка задачи. Задачей анализа является определение выходного напряжения трансформатора Тесла как зависимости, связывающей количественные характеристики разнородных физических явлений (электромагнитной индукции и резонанса), согласующейся с соответствующим качественным выводом изобретателя и полученной с помощью простейшей модели резонансного возбуждения вторичного контура трансформатора

гармоническим напряжением заданной частоты.

Математическая модель. Расчётная схема, где первичный контур рассматривается как независимый RLC – источник энергии (влияние вторичного контура пренебрежимо мало), представлена на рис. 2.

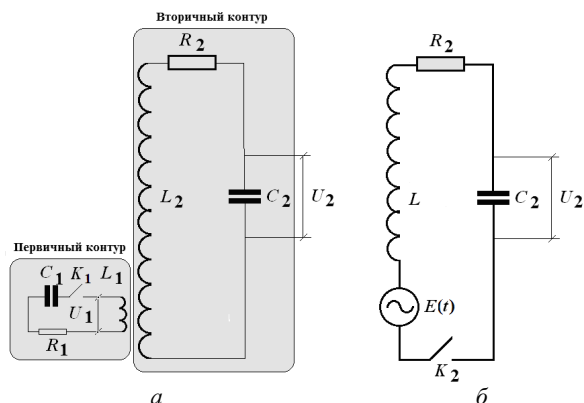


Рис. 2 – Схемы замещения трансформатора Тесла: а – электрическая; б – эквивалентная; $L_{1,2}$ – индуктивности; $C_{1,2}$ – ёмкости; $K_{1,2}$ – коммутаторы; $R_{1,2}$ – активные сопротивления контуров; $U_{0,1,2}$ и $E(t)$ – соответствующие напряжения.

- Ёмкость C_2 на схеме замещения представляет собой эквивалентный схемный параметр, величина которого устанавливается всеми электрофизическими процессами в трансформаторе и определяется по заданной индуктивности вторичной обмотки из результирующего значения рабочей частоты.

- Исследование процесса в резонансном вторичном контуре начинается с переходного режима. Начальные условия $U_2(0) = (d/dt)U_2(0) = 0$.

- Добротность вторичного контура соответственно рекомендации Н.Тесла, должна быть достаточно большой, то есть $Q_2 \gg 1$.

- Особо подчеркнём, что рассмотрение проводится с помощью известных методов теории цепей без привлечения каких-либо гипотетических представлений о природе материального мира [24, 25].

Вывод расчётных соотношений. Согласно принятой постановке задачи первичный контур есть независимый генератор гармонического напряжения, трансформируемого (с коэффициентом преобразования k_1) через индуктивную связь в цепь вторичного последовательного активно-реактивного контура. В этой связи возбуждение последнего можно рассматривать как процесс вынужденных колебаний под действием внешней гармонической силы, и уравнение для напряжения на ёмкости вторичного контура, возбуждаемого полем обмотки первичного контура, можно записать в виде [24, 25]:

$$\frac{d^2 U_2(t)}{dt^2} + 2\delta_2 \frac{dU_2(t)}{dt} + \omega_{20}^2 U_2(t) = (\omega_{20}^2 k_1) U_{1m} \sin(\omega_1 t), \quad (1)$$

где $\omega_{20} = 1/\sqrt{L_2 C_2}$ и $\delta_2 = R_2 / 2L_2$ – собственная частота и коэффициент затухания контура вторичной обмотки трансформатора Тесла, соответственно.

Общий интеграл уравнения (1) можно представить в виде суммы общего решения однородного $U_{20}(t)$ и частного решения соответствующего неоднородного уравнения $U_{21}(t)$ [25, 26]:

$$U_2(t) = U_{20}(t) + U_{21}(t), \quad (2)$$

где $U_{20}(t) = e^{-\delta_2 t} [A_1 \cos(\omega_2 t) + A_2 \sin(\omega_2 t)]$; A_1, A_2 – произвольные постоянные интегрирования;

$$\omega_2 = \sqrt{\omega_{20}^2 - \delta_2^2}; \quad (3)$$

$$U_{21}(t) = \frac{(\omega_{20}^2 k_1) U_{1m}}{(\omega_{20}^2 - \omega_1^2)^2 + (2\delta_2 \omega_1)^2} [(\omega_{20}^2 - \omega_1^2) \sin(\omega_1 t) - (2\delta_2 \omega_1) \cos(\omega_1 t)].$$

Полученное выражение (2) можно проверить предельным переходом при $t \rightarrow \infty$ с последующим допущением $\delta_2 \rightarrow 0$. С физической точки зрения речь идёт о стационарном режиме в отсутствие активных потерь во вторичном контуре.

- Первичный контур – генератор синусоидального напряжения на индуктивности L_1 с частотой ω_1 и постоянной амплитудой

$$U_{1m}, U_1(t) = U_{1m} \cdot \sin(\omega_1 t).$$

- Первичная обмотка индуктивно связана с вторичной так, что её витки w_1 частично покрывают соответствующее число витков вторичной обмотки $w_2^{(1)}$.

- Вторичная обмотка трансформатора Тесла разомкнута, вследствие чего влиянием вторичной обмотки на электромагнитные процессы в первичном контуре можно пренебречь и считать, что коэффициент трансформации по напряжению будет равен $k_1 = w_2^{(1)} / w_1$.

Из (2) с учетом (3) находим, что

$$\lim_{\substack{t \rightarrow \infty \\ \delta_2 \rightarrow 0}} U_2(t) = \frac{\omega_{20}^2 U_{1m}}{\omega_{20}^2 - \omega_1^2} \sin(\omega_1 t) \Big|_{\omega_1 \rightarrow \omega_{20}} = U_2(t) \rightarrow \infty. \quad (4)$$

Результат (4) – это хорошо известная зависимость, переход к которой свидетельствует о достоверности формулы (2) [24, 25].

Удовлетворяя нулевым начальным условиям в выражении (3), находим напряжение на ёмкости вторичного контура трансформатора Тесла.

В соответствии с постановкой задачи должна выполняться рекомендация Н. Тесла: $Q_2 \gg 1$. Это означает что $Q_2 = \omega_{20} L_2 / R_2 = 0,5 \omega_{20} / \delta_2 \gg 1$.

$$U_2(t) = \frac{(\omega_{20}^2 k_1) U_{1m}}{(\omega_{20}^2 - \omega_1^2)^2 + (2\delta_2 \omega_1)^2} \times \left[\begin{aligned} & e^{-\delta_2 t} \frac{\omega_1}{\omega_2} \left((2\delta_2 \omega_2) \cos(\omega_2 t) + (2\delta_2^2 - (\omega_{20}^2 - \omega_1^2)) \sin(\omega_2 t) \right) + \\ & + (\omega_{20}^2 - \omega_1^2) \sin(\omega_1 t) - (2\delta_2 \omega_1) \cos(\omega_1 t) \end{aligned} \right]. \quad (5)$$

Следовательно, $\delta_2 / \omega_{20} \sim 1 / Q_2 \ll 1$ есть бесконечно малая величина [26].

В выражении (5) пренебрежём бесконечно малыми величинами второго порядка и выше относительно $\sim (\delta_2 / \omega_{20})$. В этом случае можно считать, что $\omega_2 \approx \omega_{20}$. Кроме того, введём условие резонанса и примем, что резонансная частота и частота возбуждения системы равны между собой, $\omega_1 \approx \omega_{20}$.

После выполнения необходимых тождественных преобразований получим временную зависимость для резонансного напряжения на ёмкости вторичного контура трансформатора Тесла [26].

$$U_2(t) \approx \left(\frac{k_1}{2} \right) U_{1m} \left[2Q_2 \cos(\omega_1 t) \cdot (1 - e^{-\delta_2 t}) \right] \quad (6)$$

В установившемся режиме, когда $t \gg 1 / \delta_2 = 2L_2 / R_2$, пренебрегая малыми величинами порядка $(1 / Q_2)^2$ и выше, из выражения (6) находим что

$$U_2(t) \rightarrow (k_1 Q_2) U_{1m} \cos(\omega_1 t). \quad (7)$$

Из (7) получаем коэффициент преобразования напряжения в трансформаторе Тесла:

$$K_{Tesla} \rightarrow k_1 Q_2 \gg 1. \quad (8)$$

Полученный результат связывает количественные характеристики разнородных физических явлений (электромагнитной индукции и резонанса) и показывает, что трансформация напряжения при выполнении резонансных условий возбуждения и требования достаточно большой добротности вторичного контура происходит с эффективностью, намного превышающей трансформацию за счёт индуктивной связи между первичным и вторичным контурами, поскольку $K_{Tesla} / k_1 \rightarrow Q_2 \gg 1$, и, собственно $Q_2 \gg 1$.

Подчеркнём, что полученный результат (8) не требует дополнительной верификации, поскольку он коррелирует с соответствующими экспериментами Николы Тесла [1]. Кроме того, результат (8) является количественным показателем его феноменологического качественного указания о связи добротности вторичного контура трансформатора с напряжением, возбуждаемым на его выходе, то есть $U_{Tesla} \sim Q_2 = (\omega L_2 / R_2)$.

Основные результаты проведенного рассмотрения проиллюстрируем численными оценками для экспериментальной модели трансформатора Тесла. Для численных оценок полученных аналитических выражений составим программу численного расчета в продукте Wolfram Research Mathematica.

Результаты работы программы. В качестве исходных были приняты следующие данные.

1. Рабочая (резонансная) частота $f_1 = 300$ кГц, $\omega_1 = 2\pi f_1$.

2. Вторичный контур, параметры (рис. 2):

- диаметр каркаса для обмотки соленоида $D_2 = 0,075$ м;
- диаметр провода обмотки из меди с удельным сопротивлением $\gamma_2 = 5,58 \cdot 10^7$ 1/Ом·м составляет $d_2 = 0,00075$ м.

Вычисления:

- длина провода обмотки, $\zeta_2 = 249,886$ м;
- число витков $w_2 \approx 1061$;
- длина соленоида $l_2 \approx 0,8$ м;
- индуктивность соленоида $L_2 \approx 7850,4$ мкГн;
- величина скин-слоя $\Delta = 0,000093$ м;

- активное сопротивление с учётом скин-эффекта $R_2 = 18,06 \text{ Ом}$;
 - величина ёмкости, найденной по рассчитанной индуктивности и заданной рабочей частоте $C_2 = 35,85 \text{ пФ}$;
 - добротность $Q_2 = 819,338$.
3. Первичный контур, параметры (рис. 2):
- диаметр каркаса для обмотки соленоида $D_1 = 0,125 \text{ м}$;
 - диаметр провода обмотки из меди $d_2 = 0,01 \text{ м}$, число витков $w_1 = 6$;
 - $w_1 = 6$ витков первичной обмотки, общей шириной $\sim 0,06 \text{ м}$, покрывают $w_2^{(1)} \approx 80$ витков вторичной обмотки;
 - коэффициент трансформации по индуктивной связи примем равным $k_1 = w_2^{(1)} / w_1 = 14$.
- Вычисления:
- индуктивность соленоида: $L_1 \approx 9,253 \text{ мкГн}$;
 - величина активного сопротивления соленоида с учётом скин-эффекта: $R_{1i} = 0,01 \text{ Ом}$;
 - величина дополнительного активного сопротивления для выполнения рекомендации Н.Тесла о минимизации возбуждающего воздействия: $R_1 = 1,0 \text{ Ом}$.
 - величина ёмкости: $C_1 = 30417,7 \text{ пФ}$;
 - относительный декремент затухания: $\delta_1 = 0,03$;
 - добротность: $Q_1 = 16,08$; $Q_2 = 819,338$, то есть $Q_1 \ll Q_2$.

Опираясь на результаты вычислений, находим, что интегральный коэффициент преобразования напряжения в трансформаторе Тесла будет равен $K_{Tesla} \approx k_1 Q_2 = 11466 \gg 1$. Этот результат количественно согласуется с данными самого Н.Тесла [1].

Перспективы дальнейших исследований. Авторы считают перспективными пути исследования, связанные с созданием источника энергии, у которого интегральный коэффициент преобразования напряжения будет больше единицы, $k \gg 1$, что позволит создать энергоэффективные источники.

Выводы. Таким образом, в данной работе с помощью математического аппарата теории электрических цепей без привлечения каких-либо гипотез о строении материального мира показано, что трансформация напряжения при резонансном возбуждении и достаточно большой добротности вторичного контура происходит с эффективностью, намного превышающей трансформацию за счёт индуктивной связи между первичным и вторичным контурами трансформатора Тесла.

Найденный интегральный коэффициент преобразования напряжения пропорционален добротности вторичного контура трансформатора Тесла, что всецело согласуется с феноменологическим утверждением изобретателя о связи добротности вторичного контура трансформатора с напряжением, возбуждаемым на его выходе.

Следует также заметить, что полученные результаты достоверны и не требуют дополнительной верификации, поскольку подтверждаются соответствующими экспериментами Николы Тесла.

Список литературы

1. Тесла Н. Лекции и статьи. – М.: Tesla Print, 2003. – 386 с.
2. Haddad Dr. A., Warne D. F. Advances in High Voltage Engineering. – Stevenage, United Kingdom: IET, 2009. – 668 p.
3. Naidu M. S., Kamaraju V. High-Voltage Engineering (Fifth Edition). – Tata McGraw-Hill Education, 2013. – 504 p.
4. Яворский В. Энергия из ниоткуда // Наука и жизнь. – 1998. – № 10. – С. 78 – 79.
5. Lindemann P. A. Tesla's Radiant Energy. – N.Y., 2000. – 36 p.
6. Эткин В. А. Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии). – Санкт-Петербург: Наука, 2008. – 409 с.
7. Эткин В. А. О потенциале и движущей силе лучистого энергообмена // Вестник Дома Учёных Хайфы. – 2010. – Т.20, – С. 2 – 6. – Режим доступа: <http://dom-uchenyh-0620092.narod.ru/VESTNIK-20.pdf>. – Дата обращения: 05 октября 2017.
8. Lindemann Piter. The Free Energy Secrets of Cold Electricity. – Publishing House: Clear Tech Inc, 2000. – 132 p.
9. Аюковский В. А. Физические основы электромагнетизма и электромагнитных явлений. Эфиродинамическая интерпретация. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 144 с.
10. "Tesla coil". Museum of Electricity and Magnetism, Center for Learning. National High Magnetic Field Laboratory website. – Florida State Univ., 2011. – Режим доступа: <https://nationalmaglab.org/education/magnet-academy/watch-play/demos/tesla-coils>. – Дата звращения: 05 октября 2017.
11. Plesch P. H. High Vacuum Techniques for Chemical Syntheses and Measurements. – Cambridge University Press, 2005. – 167 p.
12. Gerekos Ch. The Tesla Coil. – Belgium: Université Libre de Bruxelles, Brussels, 2012. – 77 p.
13. Spratt J. Physics Demonstrations: A Sourcebook for Teachers of Physics. – Univ. of Wisconsin Press, 2006. – 302 p.
14. Denicolai M. Optimal performance for Tesla Transformers // Review of Scientific Instruments. – 2002. – Vol. 73 (9). – pp. 3332 – 3336.
15. Voitkans J., Voitkans A. Tesla Coil Theoretical Model and its Experimental Verification // Electrical, Control and Communication Engineering. – 2014. – no. 7. – pp. 11 – 19.

16. Agheb E., Hayati Sooloo A., Niayesh K., Hashemi E., Jadidian J. On the Optimum Design of Air-Cored Tesla Transformers // *Acta Physica Polonica*. – 2009. – Vol. 115 (6). – pp. 1152 – 1154.
17. Craven R. M., Smith I. R., Novac B. M. Optimizing the secondary coil of a Tesla transformer to improve spectral purity // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2014. – Vol. 42 (1). – pp. 143 – 148.
18. Denicolai M. Tesla Transformer for Experimentation and Research. Abstract of the licentiate thesis. – Helsinki : Helsinki university of technology, 2001. – 96 p.
19. Tilbury M. *The Ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide*. – McGraw-Hill, 2008. – 442 p.
20. Ацюковский В. А. Трансформатор Тесла: энергия из эфира. – Жуковский : ООО «Петит», 2004. – 24 с.
21. Желтков К. А. Пикосекундные сильноточные электронные ускорители. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 115 с.
22. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. – М. : Наука, 2004. – 704 с.
23. Мысовский Л. В. Лабораторный метод получения высоких потенциалов // *Успехи физических наук*. – 1930. – Т. X. – №4. – С. 545 – 569.
24. Яворский Б. М., Детлаф А. А., Лебедев А. К. Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов. – М. : Изд. «Оникс», 2006. – 1056 с.
25. Атабеков Г. И. Основы теории цепей. – Ленинград : Энергия, 2006. – 220 с.
26. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М. : Наука, 1973. – 832 с.

References (transliterated)

1. Tesla N. *Leksii i stat'i* [Lectures and articles]. Moscow, Tesla Print Publ., 2003. 386 p.
2. Haddad Dr. A., Warne D. F. *Advances in High-Voltage Engineering*. United Kingdom, Stevenage, IET Publ., 2009. 668 p.
3. Naidu M. S., Kamaraju V. *High-Voltage Engineering (Fifth Edition)*. Tata McGraw-Hill, Education Publ., 2013. 504 p.
4. Yavorskiy V. Energiya iz niotkuda [Energy from nowhere]. *Nauka i zhizn'* [Science and life]. 1998, no. 10, pp. 78–79.
5. Lindemann P. A. *Tesla's Radiant Energy*. New York, 2000. 36 p.
6. Etkin V. A. *Energodinamika (sintez teorii perenosa i obrazovaniya energii)* [Energy Dynamics (synthesis of transfer and energy conversion theories)]. Sankt Petersburg, Nauka Publ., 2008. 409 p.
7. Etkin V. A. O potentsiale i dvizhushchey sile luchistogo energoobmena [About the potential and the driving force of radiant energy exchange]. *Vestnik Doma Uchenykh Khai'fy* [Bulletin of Scientist's House (Haifa)]. 2010, vol. 20, pp.2–6. Available at: <http://dom-uchenyh-0620092.narod.ru/VESTNIK-20.pdf>. (accessed 05.10.2017)
8. Lindemann P. *The Free Energy Secrets of Cold Electricity*. Publishing House, Clear Tech Inc Publ., 2000. 132 p.
9. Atsyukovskiy V. A. *Fizicheskie osnovy elektromagnetizma i elektromagnitnykh yavleniy. Efirodinamicheskaya interpretatsiya* [Physical fundamentals of electromagnetism and electromagnetic phenomena. Eirdynamic interpretation]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2001. 144 p.
10. "Tesla coil". Museum of Electricity and Magnetism, Center for Learning. National High Magnetic Field Laboratory website, Florida State Univ. 2011. Available at: <https://nationalmaglab.org/education/magnet-academy/watch-play/demos/tesla-coils>. (accessed 05.10.17)
11. Plesch P. H. *High Vacuum Techniques for Chemical Syntheses and Measurements*. Cambridge University Press Publ., 2005. 167 p.
12. Gerekos Ch. *The Tesla Coil*. Belgium, Brussels, Université Libre de Bruxelles Publ., 2012. 77 p.
13. Sprott J. *Physics Demonstrations: A Sourcebook for Teachers of Physics*. Univ. of Wisconsin Press Publ., 2006. 302 p.
14. Denicolai M. Optimal performance for Tesla Transformers. *Review of Scientific Instruments*. 2002, vol. 73, no. 9, pp. 3332–3336.
15. Voitkans J., Voitkans A. Tesla Coil Theoretical Model and its Experimental Verification. *Electrical, Control and Communication Engineering*. 2014, no. 7, pp. 11–19.
16. Agheb H., Sooloo A., Niayesh K., Hashemi E., Jadidian J. On the Optimum Design of Air-Cored Tesla Transformers. *Acta Physica Polonica*. 2009, vol. 115 no. 6, pp. 1152–1154.
17. Craven R. M., Smith I. R., Novac B. M. Optimizing the secondary coil of a Tesla transformer to improve spectral purity. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, vol. 42, no. 1, pp. 143–148.
18. Denicolai M. *Tesla Transformer for Experimentation and Research. Abstract of the licentiate thesis*. Helsinki, Helsinki university of technology Publ., 2001. 96 p.
19. Tilbury M. *The Ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide*. McGraw-Hill Publ., 2008. 442 p.
20. Atsyukovskiy V. A. *Transformator Tesla: energiya iz efira* [Tesla coil: energy from air]. Zhukovskiy, ООО «Petit» Publ., 2004. 24 p.
21. Zheltkov K. A. *Pikosekundnye sil'notochnye elektronnye uskoriteli* [Picosecond high-current electron accelerators]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 115 p.
22. Mesyats G. A. *Impul'snaya energetika i elektronika* [Pulsed power engineering and electronics]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 704 p.
23. Mysovskiy L. V. Laboratornyy metod polucheniya vysokikh potentsialov [Laboratory method for obtaining high potentials]. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Successes of physical sciences]. 1930, vol. X, no. 4, pp. 545–569.
24. Yavorskiy B. M., Detlaf A. A., Lebedev A. K. *Spravochnik po fizike dlya inzhenerov i studentov VUZov* [Physics handbook for engineers and students of universities]. Moscow, Oniks Publ., 2006. 1056 p.
25. Atabekov G. I. *Osnovy teorii tsepey* [Fundamentals of circuit theory]. Leningrad, Energiia Publ., 2006. 220 p.
26. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical handbook for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 832 p.

Поступила (received) 16.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Резонанс у вторинному контурі трансформатора Тесла при збудженні гармонійною напругою / Ю. В. Батигін, Є. О. Чаплигін, С. О. Шиндерук, О. С. Сабокар // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 30 (1252). – С. 21 – 27. Бібліогр.: 26 назв. – ISSN 2222-0631.

Резонанс во вторичном контуре трансформатора Тесла при возбуждении гармоническим напряжением / Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин, С. А. Шиндерук, О. С. Сабокар // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 30 (1252). – С. 21 – 27. Бібліогр.: 26 назв. – ISSN 2222-0631.

Resonance in the secondary circuit of the Tesla transformer excited by the harmonic voltage / Yu. V. Batygin, E. A. Ghaplygin, S. A. Shynderuk, O. S. Sabokar // Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2017. – № 30 (1252). – pp. 21 – 27. Bibliogr.: 26 titles. – ISSN 2222-0631.

Бати́гін Ю́рій Ві́кторович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедрою фізики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків; тел.: (057) 707-36-53; e-mail: yu.v.batygin@gmail.com.

Батыгин Юрий Викторович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики, Харьковский национальный автомобильно-дорожный Университет, г. Харьков; тел.: (057) 707-36-53; e-mail: yu.v.batygin@gmail.com.

Batygin Yuriy Victorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Physics Chair, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkov; tel.: (057) 707-36-53; e-mail: yu.v.batygin@gmail.com.

Чапли́гін Євге́н Олекса́ндрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків; тел.: (057) 707-37-27; e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com.

Чаплыгин Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры физики, Харьковский национальный автомобильно-дорожный Университет, г. Харьков; тел.: (057) 707-37-27; e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com.

Chaplygin Evgen Olexandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Physics Chair, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkov; tel.: (057) 707-37-27; e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com.

Шинде́рук Сві́тлана Олекса́ндрівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків; тел.: (057) 707-37-27; e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net.

Шиндерук Светлана Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры физики, Харьковский национальный автомобильно-дорожный Университет, г. Харьков; тел.: (057) 707-37-27; e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net.

Shynderuk Svitlana Olexandrivna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Physics Chair, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkov; tel.: (057) 707-37-27; e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net.

Сабока́р Оле́г Серге́йович – аспірант, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків; тел.: (057) 707-37-27; e-mail: o.s.sabokar@gmail.com.

Сабокарь Олег Сергеевич – аспирант, Харьковский национальный автомобильно-дорожный Университет, г. Харьков; тел.: (057) 707-37-27; e-mail: o.s.sabokar@gmail.com.

Sabokar Oleg Serhiyovych – Postgraduate Student, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkov; tel.: (057) 707-37-27; e-mail: o.s.sabokar@gmail.com.

УДК 539.3

А. В. ВОРОПАЙ

ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПРЯМОУГОЛЬНУЮ ПЛАСТИНУ КОНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОЛЬНЫХ НАГРУЖЕНИЙ

Розглядаються імпульсні дії довільних складних навантажень на прямокутні пружні ізотропні пластини середньої товщини. Деформування пластини моделюється в рамках уточненої теорії С. П. Тимошенка. Під складними навантаженнями розуміються такі, які можуть мати не тільки поперечну, а й поздовжню складову, а також зосереджені моментні навантаження. Представлена теорія вирішення прямих і обернених задач теорії пружності при дії на пластину скінченної системи незалежних нестационарних навантажень. В рамках прямої задачі в загальному вигляді отримані підсумкові співвідношення, які дозволяють обчислювати переміщення та деформації в довільній точці пластини. Наведено загальний вигляд постановки обернених задач і викладено алгоритм їх вирішення.

Ключові слова: пластина середньої товщини, ідентифікація, нестационарне навантаження, система інтегральних рівнянь Вольтерра, регуляризуєчий алгоритм А. М. Тихонова.

Рассматриваются импульсные воздействия произвольных сложных нагрузок на прямоугольные упругие изотропные пластины средней толщины. Деформирование пластины моделируется в рамках уточненной теории С. П. Тимошенко. Под сложными нагрузками понимаются такие, которые могут иметь не только поперечную, но и продольную составляющую, а также сосредоточенные моментные нагрузки. Представлена теория решения прямых и обратных задач теории упругости при действии на пластину конечной системы независимых нестационарных нагрузжений. В рамках прямой задачи в общем виде получены итоговые соотношения, которые позволяют вычислять перемещения и деформации в произвольной точке пластины. Приведен общий вид постановки обратных задач и изложен алгоритм их решения.

Ключевые слова: пластина средней толщины, идентификация, нестационарное нагружение, система интегральных уравнений Вольтерра, регуляризирующий алгоритм А. Н. Тихонова.