

Considered the way of treating water in a strong electric field, submitted the results of studies of pH and ORP of distilled water for ten days after the treatment in the strong electric field.

A strong electric field, distilled water, electrophysical properties, flour, moisture.

УДК 621.311.1:63

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ТРАНСФОРМАТОРІ ТЕСЛИ

***В. В. Василенко, доктор технічних наук,
В. М. Комаров, аспірант****

Розглянуто електромагнітні процеси, що відбуваються в трансформаторі Тесли, та розроблено математичну модель цих процесів. При розробці математичної моделі використані експериментально визначені значення основних параметрів створеної в процесі дослідження фізичної моделі трансформатора Тесли. Використання математичної моделі дозволяє визначити раціональні значення основних параметрів трансформатора Тесли і здійснити проектування резонансних систем передачі електроенергії одним проводом.

Трансформатор Тесли, резонанс, коливальний контур, передача електроенергії.

Однією з найважливіших задач подальшого розвитку електрифікації сільського господарства є забезпечення надійного електропостачання автономних фермерських господарств і малих підприємств, віддалених від централізованих мереж електропередачі. Враховуючи той факт, що передача електроенергії здійснюється по проводах струмами провідності, втрати потужності на активному опорі проводів є неминучими. Ще в кінці XIX століття Н. Тесла розробив високочастотний трансформатор, названий його ім'ям, та на цій основі запропонував спосіб передачі електроенергії одним проводом і навіть без проводів, але ці винаходи за низкою певних причин донині практично не використовувались.

Проте аналіз наукових робіт в області електропостачання показав, що запропонований Н. Теслою спосіб передачі електроенергії одним проводом за допомогою високочастотного трансформатора є перспективним, особливо стосовно вказаної вище задачі [6]. На жаль, аналіз раніше виконаних наукових праць показав, що донині фізична сутність електромагнітних процесів, які відбуваються при передачі електроенергії одним проводом за допомогою трансформатора Тесли, досліджена не достат-

*Науковий керівник – доктор технічних наук, професор, В.В. Василенко

© В.В. Василенко, В.М. Комаров, 2013

ньо, а принцип передачі електроенергії одним проводом потребує подальшого наукового обґрунтування.

Мета досліджень – розробка математичної моделі електромагнітних процесів, що відбуваються в передавальному та приймальному трансформаторах Тесли, які є основними функціональними елементами резонансної системи передачі електроенергії одним проводом.

Матеріали та методика досліджень. Для проведення розрахункових досліджень розглядається розроблена авторами фізична модель трансформатора Тесли, принципова схема якого показана на рис. 1. та використовуються методи комп'ютерного моделювання із застосуванням програмного пакета Matlab/Simulink.

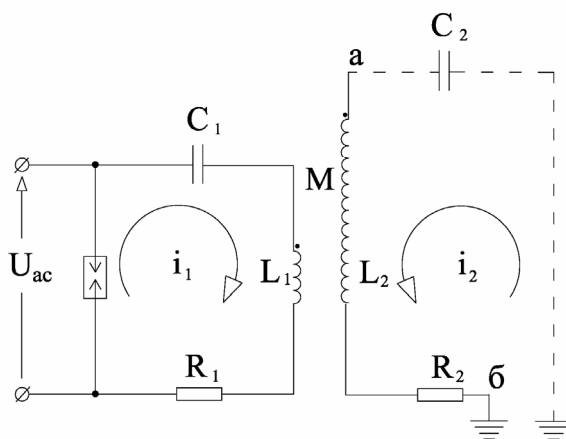


Рис. 1. Принципова схема трансформатора Тесли

Результати досліджень. Як видно з рис. 1, трансформатор Тесли складається з двох резонансних контурів. Складовими елементами первинного контуру є високовольтний конденсатор C_1 , який розряджається через розрядник на первинну обмотку з власною індуктивністю L_1 та опором R_1 . Вторинний контур являє собою розімкнену вторинну обмотку з власною індуктивністю L_2 та опором R_2 , один кінець a якої розімкнений, а інший $б$ заземлений. Цей контур також характеризується еквівалентною ємністю C_2 , яка з'єднує кінець обмотки вторинного контуру і землю (див. рис.1).

Проаналізуємо електромагнітні процеси, що відбуваються в трансформаторі Тесли. Перша фаза роботи трансформатора Тесли – це заряд високовольтної ємності C_1 через індуктивність L_1 котушки первинного контуру та її власний еквівалентний опір R_1 від джерела змінної напруги U_{ac} струмом i_1 . Після досягнення на конденсаторі C_1 напруги до рівня напруги пробоя іскрового проміжку, виникає друга фаза роботи трансформатора Тесли, коли іскровий проміжок пробивається і конденсатор C_1 розряджається на первинну обмотку, а у вторинній обмотці індукується струм i_2 . Вторинний контур трансформатора Тесли складається з послідовно з'єднаної індуктивності L_2 вторинної обмотки зі своїм власним еквівалентним опором R_2 та ємності C_2 між кінцем вторинної обмотки та заземленням і утворює вторинний резонансний контур. Слід зазначити, що первинний та вторинний контур трансформатора Тесли зв'язані між со-

бою взаємною індуктивністю M , тому при замкненому іскровому проміжку енергія передається як від первинного контуру до вторинного, так і навпаки. Це має місце до моменту розмикання іскрового проміжку. Після чого процес заряду ємності C_1 та її розряду на трансформатор повторюється.

Енергія, що запасена в ємностях C_1 та C_2 двох резонансних контурів відповідно, визначається співвідношенням:

$$W_1 = \frac{C_1 U_1^2}{2}, \quad W_2 = \frac{C_2 U_2^2}{2}. \quad (1)$$

Звідки, виходячи із рівності цих енергій, знаходимо

$$U_2 = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} U_1. \quad (2)$$

Резонансні частоти первинного та вторинного контуру при мінімальному значенні коефіцієнта зв'язку однакові, звідки отримаємо:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}. \quad (3)$$

Аналізуючи описані співвідношення, отримаємо необхідну умову щодо залежностей параметрів для первинного та вторинного контуру трансформатора Тесли, які забезпечать максимальну передачу енергії від первинного контуру до вторинного:

$$L_1 C_1 = L_2 C_2. \quad (4)$$

Згідно з другим законом Кірхгофа для первинного і вторинного контуру маємо такі рівняння балансу напруги:

$$R_1 i_1 + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = 0; \quad (5)$$

$$R_2 i_2 + \frac{1}{C_2} \int i_2 dt + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = 0. \quad (6)$$

Для отримання значення напруги вторинного контуру U_2 на ємності C_2 , необхідно розв'язати вказану систему рівнянь. Це не складно зробити в ідеальному випадку при $R_1=R_2=0$. При цьому припущенні будемо мати такий вираз для розрахунку напруги на виводах вторинної обмотки трансформатора:

$$U_2(t) = \frac{2kU_1}{\sqrt{(1-T)^2 + 4k^2 T}} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \sin\left(\frac{w_2 + w_1}{2} t\right) \sin\left(\frac{w_2 - w_1}{2} t\right), \quad (7)$$

де $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$ – коефіцієнт зв'язку між первинною та вторинною обмот-

ками трансформатора.

$$\omega_1 = \omega_2 \sqrt{\frac{(1+T) - \sqrt{(1-T)^2 + 4k^2 T}}{2(1-k^2)}};$$

$\omega_2 = \omega_2 \sqrt{\frac{(1+T) - \sqrt{(1-T)^2 + 4k^2 T}}{2(1-k^2)}}$ – кутові резонансні частоти первинного та вторинного контуру з урахуванням взаємної індуктивності;

$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}, \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$ – кутові резонансні частоти первинного та вторинного контуру;

$$T = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} = \frac{L_2 C_2}{L_1 C_1}, \text{ - коефіцієнт настроювання.}$$

З рівняння (6) для напруги вторинного контуру можна зробити висновки, що вторинна напруга з високою частотою коливань $\frac{\omega_2 + \omega_1}{2}$ підлягає амплітудній модуляції низькочастотним коливанням первинного контуру $\frac{\omega_2 - \omega_1}{2}$.

Розробка імітаційної Simulink моделі експериментальної фізичної моделі трансформатора Тесли. При розрахунках використовувались такі значення параметрів трансформатора Тесли: $R_1=15,4 \cdot 10^{-3}$ Ом, $L_1=6,9 \cdot 10^{-6}$ Гн, $C_1=5,26 \cdot 10^{-9}$ Ф, $R_2=18,5$ Ом, $L_2=4,88 \cdot 10^{-3}$ Гн, $C_2=7,45 \cdot 10^{-12}$ Ф, $k=0,308$.

Розроблена імітаційна модель для аналізу електромагнітних процесів у трансформаторі Тесли в програмному середовищі Matlab/Simulink, показаному на рис.2, включає в себе елементні блоки R, L, C, M, блоки вимірювання електричних величин, а також віртуальні осцилографи для візуалізації результатів розрахунку.

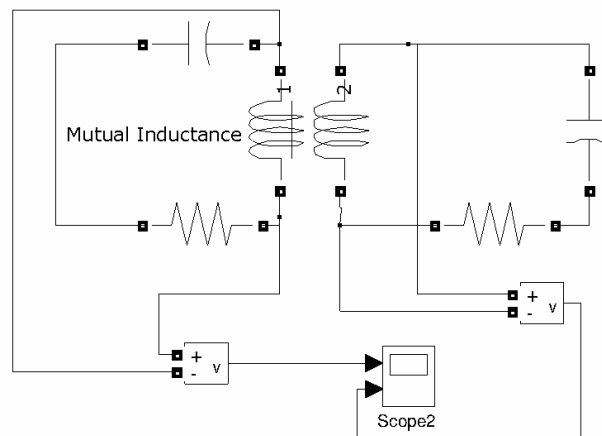


Рис. 2. Імітаційна модель трансформатора Тесли, розроблена у програмному середовищі Simulink

Результати розрахунку напруги в первинному та вторинному контурі при розряді ємності L_1 наведено на рис.3. Тут показано напругу на первинній обмотці з індуктивністю L_1 (верхня частина графіка), і напругу на вторинній обмотці з індуктивністю L_2 (нижня частина графіка). Як можна побачити, завдяки дисипативним процесам у контурах, напруга в них спадає із часом приблизно за 3 мс.

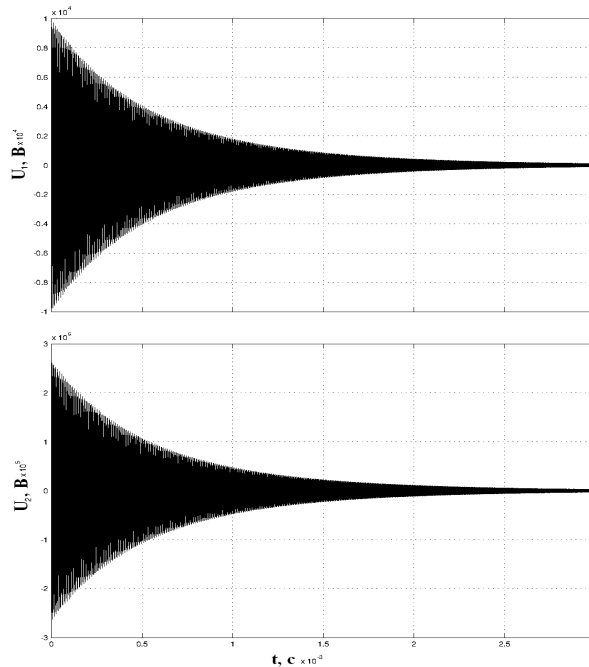


Рис. 3. Напруги первинної та вторинної обмоток трансформатора Тесли

Для деталізації форми напруги наведено графіки залежностей напруги в обмотках трансформатора Тесли у більшому масштабі за період часу $4 \cdot 10^{-5}$ с (рис. 4). Видно, що характер змінення напруги у часі збігається із виразом (6) і має дві характерні частоти.

Дослідження впливу коефіцієнта зв'язку k між первинним та вторинним контуром трансформатора Тесли показало, що він впливає на резонансну частоту первинної та вторинної обмотки, а також чисельно визначає швидкість передачі енергії від однієї обмотки до іншої і навпаки. Чим нижчий коефіцієнт зв'язку k , тим довше триває передача енергії від первинного контуру до вторинного і навпаки – зі збільшенням k збільшується час між вузлами напруги і струму. При розробці дослідних зразків з метою захисту розрядника від перегріву і подальшого виходу його з ладу коефіцієнт зв'язку приймають меншим 0,1. Два резонансних контури завжди будуть мати деяку частотну відмінність при робочому режимі з взаємною індуктивністю, оскільки на високих частотах з'являється міжвиткова ємність. Залежність впливу взаємної індуктивності і відповідно коефіцієнта зв'язку k на резонансні частоти первинного та вторинного контуру опишемо такими співвідношеннями:

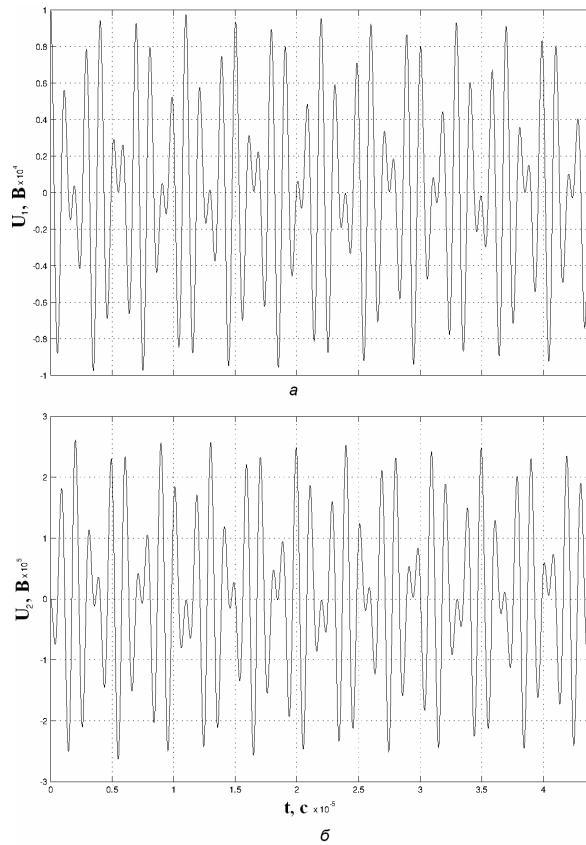


Рис. 4. Форма напруги в первинній(а) та вторинній(б) обмотці трансформатора Тесли

$$f_1 = \frac{f_r}{\sqrt{1+k}}, \quad f_2 = \frac{f_r}{\sqrt{1-k}}, \quad (7)$$

де f_1, f_2 – відповідно робочі частоти первинного та вторинного контуру з врахуванням впливу взаємної індуктивності, f_r – резонансна частота контурів без врахування взаємної індуктивності.

Графоаналітичні залежності повного опору від частоти при різних значеннях коефіцієнта зв'язку k наведено на рис. 5

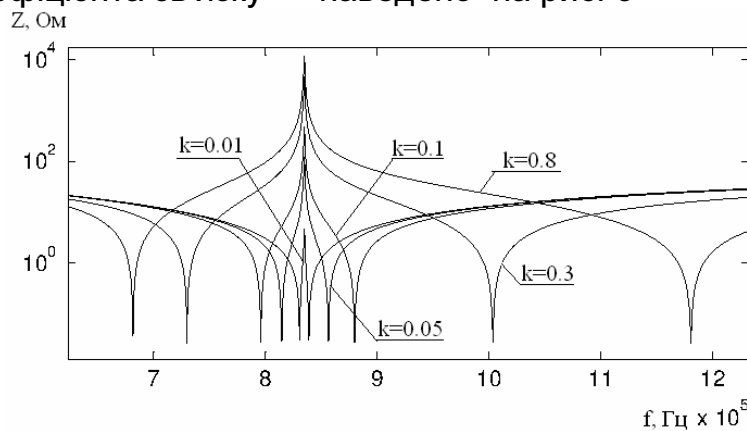


Рис. 5. Частотна характеристика трансформатора Тесли при різних значеннях коефіцієнта зв'язку k

Математична модель дає можливість визначення найраціональніших значень параметрів трансформатора Тесли, при яких досягається максимальні величини напруги в його вторинній обмотці.

Висновки

Розроблена математична модель електромагнітних процесів, що відбуваються в трансформаторі Тесли визначає значення параметрів трансформаторів Тесли за критерієм максимального значення напруги розімкненого контуру його вторинної обмотки. Ця модель може бути використана при проектуванні та вдосконаленні однопровідних систем передачі електроенергії резонансним методом. При цьому в математичній моделі використано експериментально визначені значення параметрів створеної фізичної моделі трансформатора Тесли, при яких забезпечуються мінімальні втрати електроенергії в обмотках передавального і приймального трансформаторів Тесли.

Список літератури

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – М.: Высш. шк., 1986. – 212 с.
2. Калашников С. Г. Электричество / С. Г. Калашников. – М.: Наука, 1985. – 576 с.
3. Круг К. А. Основы электротехники / К. А. Круг – М.-Л.: Гос. энерг. изд-во., 1946. – 947 с.
4. Стребков Д.С. Резонансные методы передачи электрической энергии / Д.С. Стребков, А.И. Некрасов. – М.: ГНУ ВНЭСХ, 2006. – 304 с.
5. Tesla N. Apparatus for transmission of electrical energy US Patent № 649621 / 15.05.1900. – 17 с.
6. M. Denicolai, Report TKK-SJT-52, High Voltage Institute, Helsinki University of Technology, Helsinki, 2001.

Рассмотрены электромагнитные процессы, происходящие в трансформаторе Теслы, и разработана математическая модель этих процессов. При разработке математической модели использованы экспериментально определенные значения основных параметров созданного в процессе исследования физической модели трансформатора Теслы. Использование математической модели позволяет определить рациональные значения основных параметров трансформатора Теслы и осуществить проектирование резонансных систем передачи электроэнергии одним проводом.

Трансформатор Теслы, резонанс, колебательный контур, передача электроэнергии.

In this article shown electromagnetic processes occurring in Tesla Coil and developed math model of that processes. In time of development the mathematical model were used experimentally determined values of key parameters established in the research Tesla Coil model. Using this math model allows determinate optimal values of the basic parameters for Tesla Coil and to make the design and improvement of a resonance single-wire power electric transmissions systems.

Tesla coil, resonance, oscillation circuit, electric power transmission.