

УДК 621.311.1:63

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПО ОДНОМУ ПРОВОДУ

Василенко В.В., д.т.н.,

Комаров В.М., аспірант.*

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Анотація – розглянуто електромагнітні процеси, що відбуваються у системі передачі електроенергії по одному проводу, з використанням аналітичних виразів та розробленої Simulink-моделі такої системи. Показано, що при розробці математичної моделі використані експериментально визначені величини основних параметрів створеної в процесі дослідження фізичної моделі системи передачі електроенергії по одному проводу. Встановлено, що використання моделі дозволяє визначати найбільш раціональні співвідношення значень основних параметрів трансформаторів Тесли та інших функціональних елементів системи.

Ключові слова - трансформатор Тесли, резонанс, коливальний контур, передача енергії.

Постановка проблеми. Однією з найбільш важливих задач подальшого розвитку електрифікації сільського господарства є забезпечення надійного електропостачання сільськогосподарських об'єктів дрібних фермерських господарств, тимчасових електротехнічних комплексів і споживачів малих підприємств, віддалених від централізованих мереж. Прокладання традиційних ліній електропередач(ЛЕП) до цих численних об'єктів малої потужності(до 25кВт) пов'язана зі значними затратами. Крім того, в самих ЛЕП, які виконуються за замкненою(двохпровідною) схемою, відбуваються резистивні втрати електроенергії при протіканні струму провідності крізь металеві проводи, та подоланні їх повного опору. В той же час, як відомо, ще в кінці ХІХ століття Н. Тесла на основі створеного ним високочастотного трансформатора розробив спосіб передачі електроенергії за однопровідною (розімкненою) схемою, де електроенергія передається за допомогою струму зміщення, який практично не створює резистивних втрат електроенергії, а прокладання ліній електропередачі по одному проводу потребує значно менших затрат. На

*Науковий керівник – д.т.н. Василенко В.В.

© д.т.н. Василенко В. В., аспірант Комаров В.М.

жаль, ці винаходи за низкою певних причин до цього часу практично не використовувались, а їх теоретичне обґрунтування разом з іншими науковими працями Тесли було втрачено.

Проте, аналіз наукових робіт в області електропостачання показав, що запропонований Н. Теслою спосіб передачі електроенергії по одному проводу за допомогою високочастотного трансформатора Тесли є і в наш час перспективним, особливо стосовно вказаної вище задачі.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз наукових робіт присвячених способу передачі електроенергії по одному проводу показав, що до цього часу фізична сутність електромагнітних процесів, які відбуваються при передачі електроенергії, та сам принцип передачі досліджені не достатньо. В зв'язку з цим електромагнітні процеси в системі передачі електроенергії по одному проводу потребують подальшого аналітичного дослідження та математичного моделювання в інтересах всебічного обґрунтування і формулювання принципу та теоретичних основ передачі електроенергії по одному проводу.

Формулювання мети статті. Аналіз електромагнітних процесів, що відбуваються в системі передачі електроенергії по одному проводу і, перш за все, в трансформаторах Тесли із застосуванням методів комп'ютерного моделювання та програмного пакета Matlab/ Simulink.

Основна частина. Для проведення експериментальних досліджень застосовується розроблена авторами фізична модель системи передачі електроенергії по одному проводу, принципова схема якої показана на рис. 1.

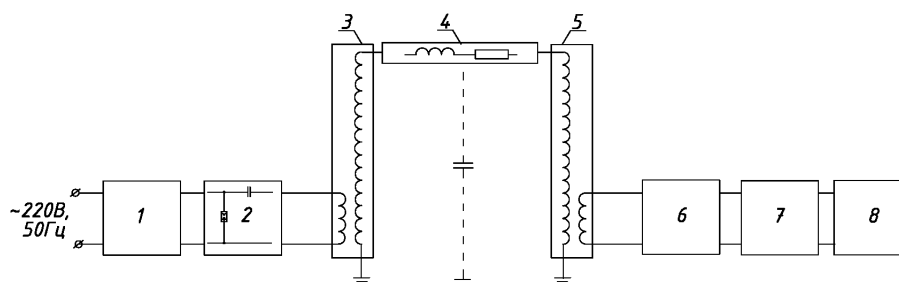


Рис.1. Принципова схема фізичної моделі системи передачі електроенергії по одному проводу.

Як видно із рис.1, фізична модель системи передачі електроенергії по одному проводу складається із таких функціональних вузлів: підвищуючого трансформатора (1), що живиться від джерела однофазного синусоїдного змінного струму; ємнісно-розрядного блока(2); передавального трансформатора Тесли (3); лінії передачі електроенергії по одному проводу (4); приймального трансформатора Тесли (5); діодно-конденсаторного випрямного блока (6); інвертора напруги ви-

прямоного постійного струму в напругу синусоїдного змінного струму промислової частоти (7) та навантаження (8).

Експериментальні дослідження розробленої згідно з наведеною принциповою схемою фізичної моделі системи передачі електроенергії по одному проводу показали її повну працездатність при резонансній частоті 500 кГц і напрузі 25 кВ, а отримані експериментальні результати дали можливість визначити фізичну сутність і послідовність електромагнітних процесів, що відбуваються у функціональних елементах системи. Як показали ці результати, функціонування системи передачі електроенергії по одному проводу відбувається наступним чином.

Електроенергія, що передається, синусоїдного змінного струму промислової частоти (220В, 50Гц), що передається, підвищується високочастотним трансформатором (1) і надходить на ємнісно-розрядний блок (2), який, по мірі зростання напруги на ємності створює разом з первинною обмоткою передавального трансформатора Тесли (3) замкнений коливальний контур і енергія переходить в вторинний контур передавального трансформатора Тесли (3), при цьому частота первинного контура налаштована на резонансну частоту (500кГц) розімкненого індуктивно-ємнісного контуру, який складається з лінії передачі електроенергії по одному проводу (4) та багатовиткових заземлених обмоток приймального (5) і передавального (3) трансформаторів Тесли. Високочастотні імпульси подаються на первинну маловиткову обмотку передавального трансформатора Тесли (3), в результаті чого на його вторинній багатовитковій (800 витків) заземленій обмотці індукується висока напруга (25 кВ), яка передається з початку цієї обмотки на однопровідну лінію електропередачі (4), під'єднану до початку багатовиткової заземленої обмотки приймального трансформатора Тесли (5), де накопичуються заряди, що стікають в ємність індуктивно-ємнісного контуру з вторинної обмотки передавального трансформатора Тесли (3), створюючи струм зміщення, який на відміну від струму провідності, як відомо, не створює резистивних теплових втрат енергії.

Високочастотна напруга та струм зміщення, подані по однопровідній лінії на первинну (багатовиткову) обмотку приймального трансформатора Тесли (5), створюють в його вторинній маловитковій замкненій обмотці понижену напругу (220В) високочастотного імпульсного струму провідності, яка подається на діодно-конденсаторний випрямний блок (6), де імпульсний струм випрямляється і заряджає ємнісний накопичувач, що згладжує пульсації випрямленого постійного струму провідності.

Слід зазначити, що струм зміщення в однопровідній лінії та багатовиткових обмотках обох трансформаторів Тесли залежить від швидкості зміни електричної індукції, або напруженості електричного поля. Густина струму зміщення, як відомо, дорівнює

$$J_{зм} = \frac{\vec{D}}{T} = \frac{\varepsilon_0 \vec{E}}{1/f_0} = \varepsilon_0 \vec{E} f_0, \quad (1)$$

де $\vec{E} = \frac{U_2}{l}$ – напруженість електричного поля, В/м; $\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E}$ – електрична індукція, Кл/м².

Випрямлений постійний струм провідності подається на інвертор напруги (7), який перетворює його в синусоїдний змінний струм промислової частоти і забезпечує живлення споживачів навантаження (8).

Таким чином, загальний принцип передачі електроенергії по одному проводу в загальному випадку полягає в перетворенні струму провідності у струм зміщення, що передається по однопровідній лінії електропередачі з наступним перетворенням його в кінці лінії електропередачі в струм провідності живлення навантаження.

Важливим питанням при розрахунку елементів системи передачі електроенергії по одному проводу є принцип передачі електромагнітної енергії в трансформаторі Тесли, принципова схема якого показана на рис. 2.

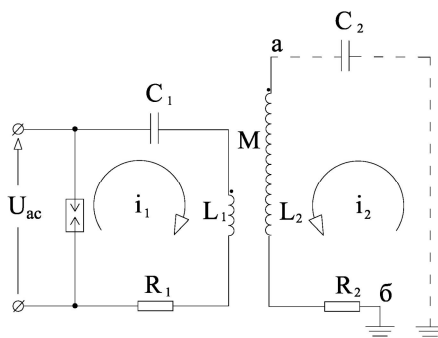


Рис.2. Принципова схема трансформатора Тесли.

Як видно з рисунку, 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 b заземлений. Цей контур також характеризується еквівалентною ємністю C_2 , яка з'єднує кінець обмотки вторинного контуру із землею.

Проаналізуємо електромагнітні процеси, що відбуваються в трансформаторі Тесли. Перша фаза роботи трансформатора Тесли – це заряд високовольтної ємності C_1 через індуктивність L_1 катушки первинного контуру та її власний еквівалентний опір R_1 від джерела змінної напруги U_{ac} струмом $i_1(t)$. По досягненню 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 з своїм власним еквівалентним опором R_2 і ємності C_2 між кінцем вторинної обмотки та заземленням і утворює вторинний резонансний контур. Слід відзначити, що первинний та вторинний контур трансформатора Тесли зв'язані між собою 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:

$$W_1 = \frac{C_1 U_1^2}{2}; W_2 = \frac{C_2 U_2^2}{2}.$$

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 другого закону Кірхгофа для первинного і вторинного контуру впливають наступні 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 наступний вираз для розрахунку напруги на виводах вторинної обмотки трансформатора

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

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

обмотками трансформатора; $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$, $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$ – кутові резона-

нсні частоти первинного та вторинного контуру; $T = \omega_1^2 / \omega_2^2 = L_2 C_2 / L_1 C_1$ – коефіцієнт настрій-

ки; $w_1 = \omega_2 \sqrt{\frac{(1+T) - \sqrt{(1-T)^2 + 4k^2 T}}{2(1-k^2)}}$, $w_2 = \omega_2 \sqrt{\frac{(1+T) + \sqrt{(1-T)^2 + 4k^2 T}}{2(1-k^2)}}$ –

кутові резонансні частоти первинного та вторинного контуру з урахуванням взаємної індуктивності.

З рівняння (6) для напруги вторинного контуру можна зробити висновок, що вторинна напруга з високою частотою коливань $(w_2 + w_1)/2$ підлягає амплітудній модуляції низькочастотним коливанням первинного контуру $(w_2 - w_1)/2$.

Таким чином, реалізація принципу передачі електроенергії по одному проводу здійснюється шляхом перетворення синусоїдного змінного струму промислової напруги і частоти в імпульсний змінний струм високої частоти і напруги. При цьому у розімкненій і заземленій однопровідній лінії передачі виникає струм зміщення, що разом з високою напругою передавального трансформатора Тесли створює плоскі електромагнітні хвилі, які є носіями електричної енергії, що подається на приймальний трансформатор Тесли. Його замкнена вторинна обмотка разом з діодно-конденсаторним випрямним блоком перетворює струм зміщення в постійний струм провідності з подальшим його перетворенням інвертором напруги в синусоїдний змінний струм промислової частоти і напруги, який живить споживачів навантаження. Слід також відмітити, що носієм електроенергії, яка передається системою передачі по одному проводу, є бігуча плоска електромагнітна хвиля напруженості електричного і магнітного полів, що створюється при підключенні навантаження і поширюється вздовж напрямного каналу системи разом зі стоячими електромагнітними хвилями, які виникли до підключення навантаження в режимі холостого ходу.

Важливим фактором при розрахунку трансформатора Тесли є правильний вибір параметрів високовольтного конденсатора C_1 первинного контуру. Зазвичай при побудові трансформатора Тесли високовольтна напруга для його живлення отримується від підвищувального трансформатора з вбудованою або зовнішньою індуктивністю – дроселем. Дросель відіграє, як роль обмежувача струму, так і впливає на резонансні умови в первинному контурі трансформатора Тесли на етапі заряджання ємності C_1 . Конденсатор C_1 повинен заря-

джатися до напруги пробною іскрового розрядника при сталій напрузі живлення.

Цього явища можна досягти підбираючи значення ємності конденсатора близькій до резонансної. Крім цього конденсатор не повинен знаходитися під напругою, що перевищує його номінальне значення, з метою запобігання його швидкого виходу з ладу.

При розрахунку резонансних властивостей фізичної моделі діючого трансформатора Тесла використовувались параметри: індуктивність дроселя $L=318\text{Гн}$, величина ємності C_1 приймала наступні значення: 128 нФ, 64 нФ, 32 нФ, 16 нФ, 8 нФ. Графічні залежності повного опору від частоти при відповідних значеннях ємності показані на рис. 3.

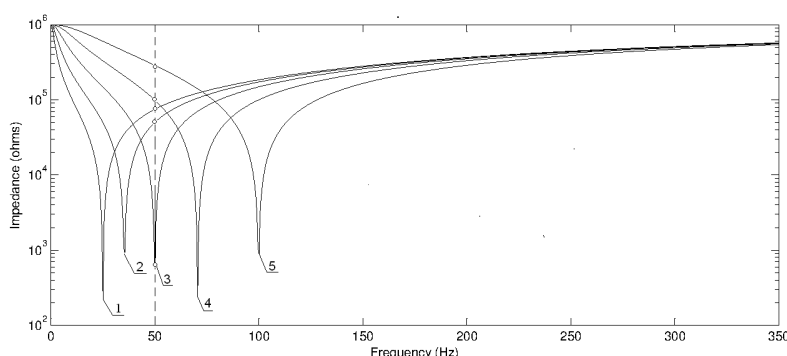


Рис.3. Частотна залежність повного опору від ємності в колі первинного контуру.

Результати моделювання свідчать про те, що найбільш раціональним є вибір і застосування в схемі ємності $C_1=16\text{ нФ}$ з резонансною частотою 70Гц. Крім цього варто звернути увагу на те, що робота схеми при застосуванні ємності 32 нФ не допустима, так як в контурі виникне резонанс і напруга на ємності перевищить номінальне значення, що призведе до швидкого виходу її з ладу. Отже, при виборі чисельного значення ємності конденсатора первинного контуру слід вибирати її значення в межах 0,25-0,5 від її резонансного значення в первинному контурі при частоті 50Гц.

Розробка Simulink моделі експериментальної фізичної моделі системи передачі електроенергії по одному проводу. При розрахунках використовувались наступні значення параметрів трансформаторів Тесли: $R_1=15,4\cdot 10^{-3}\text{ Ом}$; $L_1=6,9\cdot 10^{-6}\text{ Гн}$; $C_1=1,46\cdot 10^{-8}\text{ Ф}$; $R_2=18,5\text{ Ом}$; $L_2=4,88\cdot 10^{-3}\text{ Гн}$; $C_2=2,07\cdot 10^{-11}\text{ Ф}$; $k=0,308$; $L_n=2,248\cdot 10^6\text{ Гн}$; $R_n=1,05\cdot 10^{-4}\text{ Ом}$.

Розроблена модель для аналізу електро-магнітних процесів у системі передачі електроенергії по одному проводу. В програмному пакеті Matlab/Simulink показана на рис.4, і включає елементні блоки R , L , C , M , блоки вимірювання електричних величин – напруги, а також віртуальні осцилографи для візуалізації результатів розрахунку.

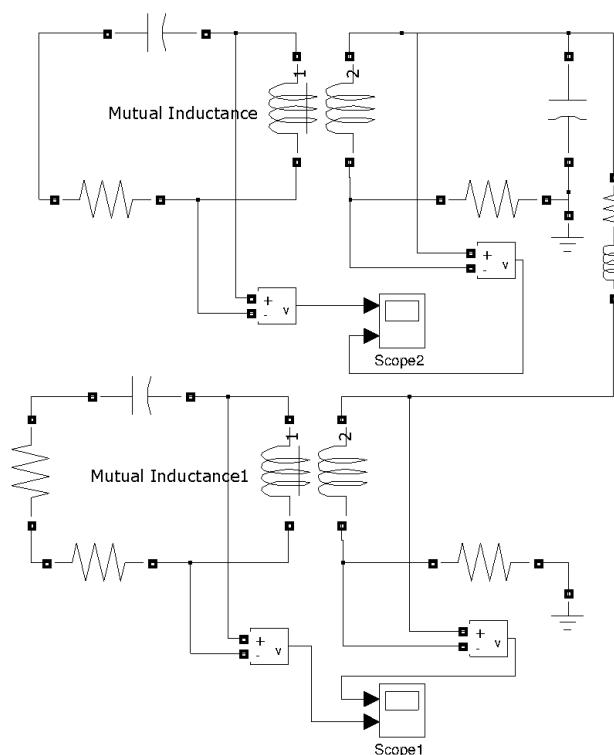


Рис.4. Simulink – модель системи передачі електроенергії по одному проводу.

Результати розрахунку напруги в первинному та вторинному контурі при розряді ємності L_1 показані на рис. 5. Тут показано напругу на первинній обмотці з індуктивністю L_1 (верхня частина графіку), і напругу на вторинній обмотці з індуктивністю L_2 (нижня частина графіку). Як можна побачити, завдяки дисипативним процесам в контурах напруга в цих контурах спадає із часом приблизно за 3 мс.

Дослідження впливу коефіцієнт зв'язку k між первинним та вторинним контуром трансформатора Тесла показало, що він впливає на резонансну частоту первинної та вторинної обмотки, а також чисельно визначає швидкість передачі енергії від одної 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 напругу 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, так як на високих частотах з'являється міжвиткова ємність.

Залежність впливу взаємної індуктивності і відповідно коефіцієнт зв'язку k на резонансні частоти первинного та вторинного контуру опишемо наступним співвідношеннями:

$$f_1 = \frac{f_r}{\sqrt{1+k}}; f_2 = \frac{f_r}{\sqrt{1-k}}, \quad (8)$$

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.

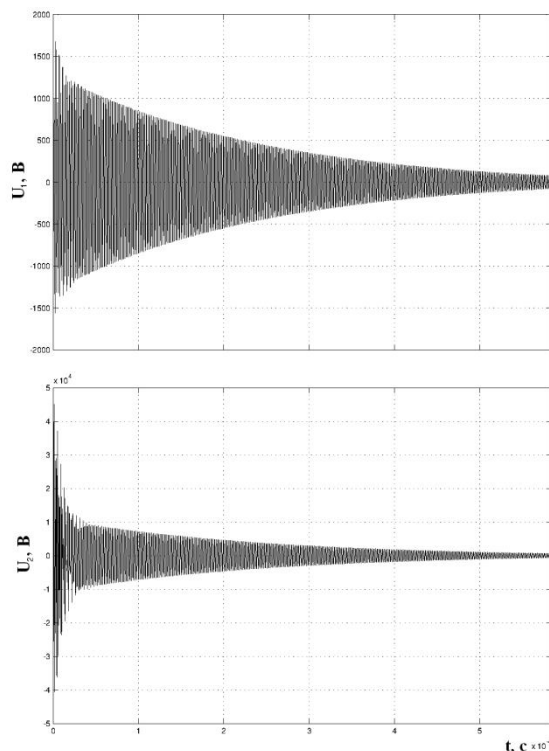


Рис.5. Напруги в первинній та вторинній обмотці трансформатора Тесли.

Графоаналітичні залежності повного опору від частоти при різних значеннях коефіцієнт зв'язку k приведені на рис. 6.

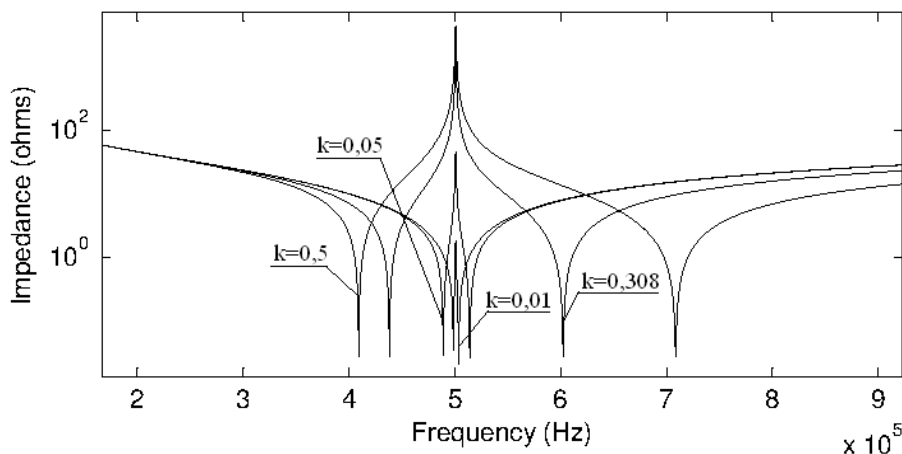


Рис.6. Частотна характеристика трансформатора Тесли при різних значеннях коефіцієнту зв'язку k .

Таким чином, розроблена Simulink-модель системи передачі електроенергії по одному проводу дає можливість провести аналіз електромагнітних процесів і визначити основні її параметри та елементи. При розробці математичної моделі використані експериментально визначені значення параметрів створеної фізичної моделі системи передачі електроенергії по одному проводу, при яких забезпечуються мінімальні втрати електроенергії в обмотках передавального і приймального трансформаторів Тесли. Розроблена модель може бути використана при проектуванні та вдосконаленні однопровідних систем передачі електроенергії резонансним методом.

Висновки. На основі проведеного аналізу системи передачі електроенергії по одному проводу та створення математичної моделі, отримані наступні результати.

1. Сформульовано принцип передачі електроенергії по одному проводу, який в загальному випадку полягає в перетворенні струму провідності у струм зміщення, що передається по однопровідній лінії електропередачі, та зворотнім перетворенням його в кінці лінії електропередачі в струм провідності живлення навантаження.

2. Встановлено, що реалізація принципу передачі електроенергії по одному проводу здійснюється шляхом перетворення синусоїдного змінного струму промислової напруги і частоти в імпульсний змінний струм високої частоти і напруги. При цьому у розімкненій та заземленій однопровідній лінії передачі (напрямоному каналі) виникає струм зміщення, що разом з високою напругою передавального трансформатора Тесли створює плоскі електромагнітні хвилі, які є носіями електричної енергії, що подається на багатовиткову обмотку приймального трансформатора Тесли. Тоді його замкнена вторинна обмотка разом з діодно-конденсаторним випрямним блоком перетворює струм зміщення в постійний струм провідності з подальшим його перетворенням інвертором напруги в синусоїдний змінний струм промислової частоти і напруги для живлення навантаження.

3. Розроблена Simulink-модель системи передачі електроенергії по одному проводу дає можливість провести аналіз електромагнітних процесів і визначити найбільш раціональний варіант співвідношень розрахункових параметрів.

Література

1. Теоретические основы электротехники. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле / [Г.И. Атабеков, С. Д.Купалян, А. Б.Тимофеев, С.С.Хухриков].– М.: Энергия, 1979. – 427 с.

2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л.А.Бессонов.– М.: Высш.шк., 1986. – 212с.

3. *Круг К. А.* Основы электротехники/ *К. А. Круг.*– М.– Л.: Гос. энерг. изд-во., 1946. – 947 с.

4. *Tesla N.* Apparatus for transmission of electrical energy US Patent № 649621/ 15.05.1900. – 17 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО ОДНОМУ ПРОВОДУ

Василенко В.В., Комаров В.М.

Аннотация

Рассмотрены электромагнитные процессы, происходящие в системе передачи электроэнергии по одному проводу, с использованием аналитических выражений и разработанной Simulink-модели такой системы. Показано, что при разработке математической модели использованы экспериментально определенные величины основных параметров созданной в процессе исследования физической модели системы передачи электроэнергии по одному проводу. Установлено, что использование модели позволяет определять наиболее рациональные соотношения значения основных параметров трансформаторов Теслы и других функциональных элементов.

SIMULATION AND EXPERIMENTAL RESEARCHES OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN THE SINGLE-WIRE POWER TRANSMISSION

V. Vasylenko, V. Comarov

Summary

This article describes electromagnetic processes occurring in the single-wire power transmission system by using analytical expressions and developed Simulink-model of such a system. It is shown that the mathematical model development based on experimentally determined values of key parameters established during the investigation of a physical model single-wire power transmission system. Found that using the model can determine the most rational relations for basic settings Tesla Coil and functionality of the system.