

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОДНОПРОВІДНОЇ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

**В.В. Василенко**, доктор технічних наук

**В.М. Комаров**, асистент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

**Розглянуто електромагнітні процеси, що відбуваються в однопровідній системі передачі електроенергії та розроблено математичну модель цих процесів. При її розробці використано експериментально визначені значення параметрів створеної в процесі дослідження фізичної моделі однопровідної системи передачі електроенергії. Показано аналітичні залежності для визначення найбільш раціональних значень основних параметрів системи.**

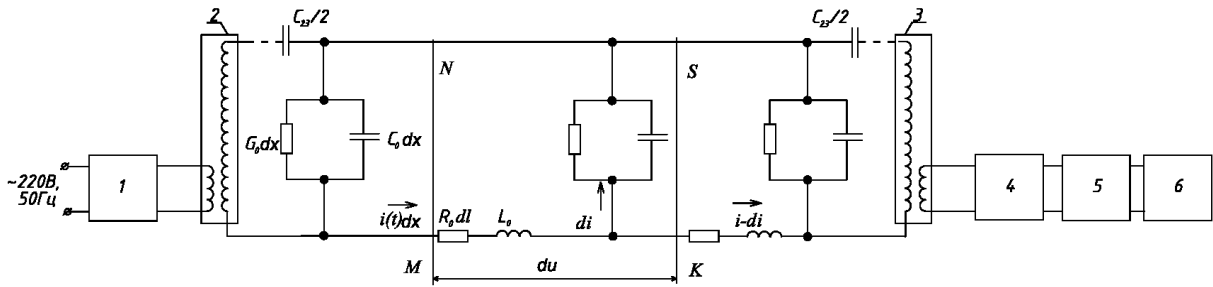
**Вступ.** Останнім часом значна увага приділяється використанню у системах передачі електроенергії тесловських схем, історія застосування яких почалася ще в кінці XIX століття, коли Н. Тесла розробив високочастотний трансформатор і запропонував спосіб передачі електроенергії по одному проводу й навіть без проводів [4]. Однак через низку певних причин ці винаходи до нинішнього часу практично не використовувались.

Аналіз наукових робіт в області електропостачання показав, що запропонований Н. Теслою спосіб передачі електроенергії по одному проводу за допомогою високочастотного трансформатора є перспективним. На жаль, фізичну сутність електромагнітних процесів, що відбуваються при передачі електроенергії по одному проводу за допомогою високочастотних трансформаторів досліджено не достатньо, а принцип передачі електроенергії по одному проводу та математична модель електромагнітних процесів потребують розроблення і подальшого наукового обґрунтування.

Однією з відомих однопровідних схем передачі електроенергії є схема зарядки ємнісного накопичувача енергії, запропонована [15], однак феномен передачі електроенергії по одному проводу не був пояснений. Розв'язання цієї проблеми було вперше показано в роботі [8], де описано процес передачі та отримано аналітичні вирази для обчислення основних параметрів процесу. Основна ідея пояснення феномена в обґрунтуванні ідентичності тесловських схем зарядки конденсатора схемі подвоєння Латура, теорія якої достатньо добре і давно розроблена [14], що дало можливість провести ряд експериментів та удосконалення однопровідної схеми електропостачання. Однак досліджень з однопровідними системами передачі електроенергії на основі двох високовольтних трансформаторів для кращого узгодження високовольтної частини системи з низьковольтною не проводились.

Результати досліджень та їх обговорення. Задля проведення розрахункових досліджень розглядається розроблена авторами фізична модель однопровідної системи передачі електроенергії, принципову схему якої показано на рис.

Як видно з рисунку, фізична модель системи передачі електроенергії по одному проводу складається із таких функціональних вузлів: транзисторного інвертора напруги (1), що живить передавальний високочастотний трансформатор (2), з'єднаний одним проводом з приймальним високочастотним трансформатором (3), на вихід якого підключено діодно-конденсаторний випрямний блок (4), інвертор напруги випрямленого постійного струму в напругу синусоїдного змінного струму промислової частоти (5) та навантаження (6).



**Рис. Принципова схема однопровідної системи передачі електроенергії**

Експериментальні дослідження розробленої згідно з наведеною принциповою схемою фізичної моделі системи передачі електроенергії по одному проводу показали її повну працездатність за резонансної частоти 350 кГц і напруги 50 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), перетворюється транзисторним інвертором (1) і налаштовується на резонансну частоту роботи системи та надходить на первинну обмотку передавального високочастотного трансформатора (2), вторинна високовольтна обмотка якого з'єднана одним проводом з високовольтною обмоткою приймального високочастотного трансформатора. Слід відзначити, що таке з'єднання обмоток утворює розімкнений контур, де проходить струм зміщення, який, на відміну від струму провідності, не пов'язаний із втратами енергії. Необхідною умовою при налаштуванні системи є відповідність частоти вихідної напруги транзисторного інвертора з резонансною частотою (350 кГц) розімкненого індуктивно-ємнісного контуру, що включає лінію передачі електроенергії по одному проводу та багатовиткові обмотки приймального (3) і передавального (2) високочастотних трансформаторів.

Крім того, струм зміщення в однопровідній лінії та багатовиткових обмотках обох високочастотних трансформаторів залежить від швидкості зміни електричної індукції або напруженості електричного поля. Густина струму зміщення, як відомо, дорівнює:

$$J_{ei} = \frac{\vec{D}}{T} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \vec{E}}{\frac{1}{f_0}} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} \cdot f_0, \quad \frac{A}{\text{m}^2}, \quad (1)$$

де  $\vec{E} = \frac{U_2}{l}$ ,  $\frac{\hat{A}}{\hat{i}}$  - напруженість електричного поля;

$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E}$ ,  $\frac{\hat{E}\ddot{e}}{\hat{i}^2}$  - електрична індукція.

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 в розімкненій однопровідній лінії передачі виникає струм зміщення, що разом із високою напругою передавального високочастотного трансформатора створює плоскі електромагнітні хвилі — носії електричної енергії, яка подається на приймальний високочастотний трансформатор. 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 зазначити, що носієм електроенергії, яка передається системою передачі по одному проводу, є бігуча плоска електромагнітна хвиля напруженості електричного і магнітного полів, створена при підключенні навантаження і

поширюється вздовж напрямного каналу системи разом зі стоячими електромагнітними хвилями, котрі виникли до підключення навантаження в режимі холостого ходу.

Розімкнений контур однопровідної системи передачі енергії складається з послідовно з'єднаних елементів довжиною  $dl$  з опором  $r_0 dl$ , індуктивністю  $L_0 dl$ , причому в точках з'єднання двох суміжних елементів включені розгалуження з активною проовідністю  $G_0 dx$  і ємністю  $C_0 dx$ . При цьому, хоча падіння напруги має місце в обох проводах, за схематичного зображення лінії можемо рахувати, що падіння напруги відбувається тільки у верхній половині кожного елемента.

Нехай  $u$  — напруга між проводами на початку елемента (переріз MN),  $du$  — зміна напруги по довжині цього елемента. Це зменшення викликано падінням напруги в опорі та індуктивним падінням напруги:

$$-\frac{\partial u}{\partial t} dl = R_0 i dl + L_0 dl \frac{\partial i}{\partial t}, \quad (2)$$

де  $i$  - миттєве значення струму.

У кінці елемента(переріз KS) струм у лінії змінюється на  $-di$ , оскільки він зменшиться на величину часткового струму по довжині  $dl$ .

Частковий струм складається зі струму провідності та струму зміщення між проводами, викликаного зміною напруги в часі:

$$-\frac{\partial i}{\partial t} dl = G_0 u dl + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} dl. \quad (3)$$

Розділивши рівняння на  $dl$  ми отримаємо систему диференціальних рівнянь:

$$-\frac{\partial u}{\partial t} = R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \quad (4)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial t} = G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (5)$$

з яких випливає, що зміна(зменшення) напруги відносно до одиниці довжини складається з активного падіння напруги в опорі одиниці довжини та з індуктивного падіння напруги в індуктивності одиниці довжини лінії і зміна (зменшення) струму, відносно до одиниці довжини, складається зі струму провідності між проводами на протяжності одиниці довжини та із ємнісного струму в ємності між проводами також на протяжності одиниці довжини лінії.

Нехай  $\dot{U}$  та  $\dot{I}$  — напруга і струм у будь-якій точці лінії, розташованій від початку на відстані  $l$ . Можна, застосувавши синусоїдальні струми, записати останні два рівняння в комплексній формі:

$$-\frac{d\dot{U}}{dl} = (R_0 + j\omega L_0) \dot{I} = Z_0 \dot{I}; \quad (6)$$

$$-\frac{d\dot{I}}{dl} = (G_0 + j\omega C_0) \dot{U} = Y_0 \dot{U}, \quad (7)$$

де  $Z_0$ ,  $Y_0$  — відповідно повний опір (вздовж проводів) та повна провідність (між проводами) одиниці довжини лінії.

Якщо взяти другі похідні від рівнянь і підставити перші похідні по цим рівнянням:

$$-\frac{d^2 \dot{U}}{dl^2} = Z_0 \frac{d\dot{I}}{dl} = -Z_0 Y_0 \dot{U}; \quad (8)$$

$$-\frac{d^2 \dot{I}}{dl^2} = Y_0 \frac{d\dot{U}}{dl} = -Z_0 Y_0 \dot{I}, \quad (9)$$

то ми отримаємо два рівняння:

$$\frac{d^2 \dot{U}}{dl^2} = Z_0 Y_0 \dot{U} = \gamma^2 \dot{U}; \quad (10)$$

$$\frac{d^2 \dot{I}}{dl^2} = Z_0 Y_0 \dot{I} + \gamma^2 \dot{I}, \quad (11)$$

де  $\gamma^2 = \beta + j\alpha = Z_0 Y_0$ .

Розв'язком його є:

$$\dot{U} = A_1 e^{-\gamma l} + A_2 e^{\gamma l}; \quad (12)$$

$$\dot{I} = B_1 e^{-\gamma l} + B_2 e^{\gamma l}. \quad (13)$$

Коефіцієнти  $A_1, A_2, B_1, B_2$  визначаються з пограничних умов. Якщо нам дано по величині та фазі напруга  $\dot{U}_1$  і струм  $\dot{I}_1$  на початку лінії та відстані, відрахованої від початку  $l=0$ , отримаємо:

$$\dot{U}_1 = A_1 + A_2 \text{ та } \dot{I}_1 = B_1 + B_2. \quad (14)$$

Якщо похідні від  $\dot{U}$  та  $\dot{I}$  перетворити і прирівняти  $l=0$ , то:

$$-\left. \frac{d\dot{U}}{dl} \right|_{l=0} = \gamma(A_1 - A_2) = Z_0 \dot{I}_1; \quad (15)$$

$$-\left. \frac{d\dot{I}}{dl} \right|_{l=0} = \gamma(B_1 - B_2) = Y_0 \dot{U}_1, \quad (16)$$

з цих рівнянь отримаємо коефіцієнти:

$$A_1 = \frac{1}{2}(\dot{U}_1 + \frac{Z_0}{\gamma} \dot{I}_1) = \frac{1}{2}(\dot{U}_1 + Z_c \dot{I}_1); \quad (17)$$

$$A_2 = \frac{1}{2}(\dot{U}_1 - \frac{Z_0}{\gamma} \dot{I}_1) = \frac{1}{2}(\dot{U}_1 - Z_c \dot{I}_1); \quad (18)$$

$$B_1 = \frac{1}{2}(\dot{I}_1 + \frac{Y_0}{\gamma} \dot{U}_1) = \frac{1}{2}(\dot{I}_1 + \frac{\dot{U}_1}{Z_c}); \quad (19)$$

$$B_2 = \frac{1}{2}(\dot{I}_1 - \frac{Y_0}{\gamma} \dot{U}_1) = \frac{1}{2}(\dot{I}_1 - \frac{\dot{U}_1}{Z_c}), \quad (20)$$

де  $Y_c = \frac{Z_0}{\gamma}$ .

Якщо підставити значення коефіцієнтів  $A_1, A_2, B_1, B_2$  у рівняння (11,12), то отримаємо систему рівнянь для  $\dot{U}$  та  $\dot{I}$  у точці від початку лінії на відстані  $l$ :

$$\dot{U} = \dot{U}_1 \frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2} - Z_c \dot{I}_1 \frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2} = \dot{U}_1 ch \gamma l - Z_c \dot{I}_1 sh \gamma l;$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 \frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2} - \frac{\dot{U}_1}{Z_c} \frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2} = \dot{I}_1 ch \gamma l - \frac{\dot{U}_1}{Z_c} sh \gamma l.$$

Якщо, навпаки, нам задано напругу і струм у кінці лінії  $\dot{U}_2$  та  $\dot{I}_2$  і відстань  $l$  відрахована від кінця лінії, то співвідношення для визначення напруг та струмів у будь-якій точці системи:

$$\dot{U} = \dot{U}_2 ch \gamma l + Z_c \dot{I}_2 sh \gamma l; \quad (21)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_2 ch \gamma l + \frac{\dot{U}_2}{Z_c} sh \gamma l. \quad (22)$$

## Висновки

1. Сформульовано принцип передачі електроенергії по одному проводу, який полягає в перетворенні струму провідності у струм зміщення, що проходить у розімкненому індуктивно-ємнісному контурі однопровідної лінії електропередачі, та зворотнім перетворенням його в кінці лінії електропередачі в струм провідності живлення навантаження.

2. Реалізація принципу передачі електроенергії по одному проводу здійснюється шляхом перетворення синусоїдного змінного струму промислової напруги і частоти в

змінний струм високої частоти і напруги. При цьому в розімкненому індуктивно-ємнісному контурі однопровідної лінії передачі виникає струм зміщення, що разом з високою напругою передавального трансформатора Тесли створює плоскі електромагнітні хвилі, носії електричної енергії, яка 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 математична модель системи передачі електроенергії по одному проводу дає можливість провести аналіз електромагнітних процесів і визначити найбільш раціональні їх величини на основі дослідження експериментального зразка.

## Література

1. Атабеков Г.И., Купалян С. Д., Тимофеев, А. Б., Хухриков С. С. Теоретические основы электротехники. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле. — М.: Энергия, 1979. — 427 с.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. — М.: Высш. шк., 1986 — 212 с.
3. Волков И.В., Пентегов И.В. Тесловские процессы в высоковольтных высокочастотных электрических цепях // Технічна електродинаміка: Тем. випуск "Проблеми сучасної електротехніки". Ч. 1. — К.: ІЕД НАНУ, 2000. — С. 7—11.
4. Н.Е. Заев, С.В. Авраменко, В.Н. Лисин, Измерение тока проводимости, возбуждаемого поляризационным током // Журнал русской физической мысли. — 1991. — № 2. — С. 68—81.
5. Калашников С. Г. Электричество. — М.: Наука, 1985. — 576 с.
6. Нейман Л.Р., Демирчян К.С., Теоретические основы электротехники. — М.-Л.: Энергия, 1966. — Т.1. — 522 с.
7. Нейман Л.Р., Демирчян К.С., Теоретические основы электротехники. — М.-Л.: Энергия, 1966. — Т.2. — 407 с.
8. И.В. Пентегов, К теории тесловских процессов зарядки емкостных накопителей энергии // Электричество. — 1996. — №6. — С. 42—47.
9. И.В. Пентегов, Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. — К.: Наукова думка, 1982. — 424 с.
10. И.В. Пентегов, Е.П. Стемковский, Д.А. Шейковский, И.В. Волков, И.С. Закревский, Физические особенности тесловских процессов и их зависимость от диэлектрической проницаемости окружающей среды // Технічна електродинаміка: Тем. випуск "Проблеми сучасної електротехніки". Ч. 3. — К.: ІЕД НАНУ, 2000. — С. 3—6.
11. Пентегов И.В., Волков И.В. Тесловские процессы при работе схемы Латура на омическую нагрузку // Технічна електродинаміка: Тем. випуск "Силовая електроніка і енергоефективність". Ч. 1. - К.: ІЕД НАНУ, 2000. — С. 13—18.
12. Пентегов И.В., Волков И.В., Приступа А.Л. О возможности осуществления бесконтактной подзарядки аккумуляторов имплантированных электростимуляторов // Технічна електродинаміка: Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". Ч.5. — К.: ІЕД НАНУ, 2008. — С. 109—113.
13. Пентегов И.В., Волков И.В., Приступа А.Л. Применение тесловских процессов для бесконтактного заряда аккумуляторов бытовых электрических устройств // Технічна електродинаміка: Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". Ч.2. — К.: ІЕД НАНУ, 2006. — С. 16—21.
14. И.В. Пентегов, Стемковский Е.П., Исследование переходных процессов при зарядке батареи конденсаторов с помощью выпрямителя, собранного по схеме Латура // Проблемы технической электродинамики. — 1970. — Вып. 24. — С. 107—111.
15. Стребков Д.С., Некрасов А.И. Резонансные методы передачи электрической энергии. — М.: ГНУ ВНЭСХ, 2006. — 304 с.

16. Fano R., Chu L.J., Adler R.B. Electromagnetic Fields, Energy and Forces. — Wiley, 1960. — P. 257—259.
17. R. Adler, L.J. Chu, and R. Fano, Electromagnetic Energy Transmission and Radiation. — Wiley, 1960. — P. 202.
18. J.D. Ryder. Networks, Lines and Fields - 2nd edition. — Prentice-Hall, 1955. —P. 348.
19. I.V. Pentegov. Theory of Tesla processes in the charging of capacitive energy storages // Electrical Technology. — 1996. — №2. — P. 119—128.
20. Tesla N. Apparatus for transmission of electrical energy US Patent № 649621/ 15.05.1900. — 17 p.

#### АННОТАЦИЯ

**Василенко В. В., Комаров В. М.** Математическая модель однопроводной высокочастотной системы передачи электроэнергии // Биоресурсы и природопользование. — 2013. — 5, № 5—6. — С. 113—118.

Рассмотрены электромагнитные процессы, происходящие в однопроводной системе передачи электроэнергии, и разработана математическая модель этих процессов. При разработке математической модели использованы экспериментально определенные значения параметров созданной в процессе исследования физической модели однопроводной системы передачи электроэнергии. Определены наиболее рациональные значения основных параметров системы.

#### SUMMARY

**V. Vasylenko, M. Komarov.** Mathematical model of the high frequency single wire power transmission line // Biological Resources and Nature Management. — 2013. — 5, № 5—6. — P. 113—118.

In the article shown electromagnetic processes in single-wire power transmission system have been presented and the mathematical model of these processes has been developed. Experimentally determined values of the physical model of single wire power transmission system created in the process of study were used to develop mathematical model. The most rational values of the basic parameters of the system have been determined.