

5. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур / Р.А. Полуэктов, Э.И. Смоляр, В.В. Терлеев, А.Г. Топаж. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2006. – 290 с.

6. Торнли Дж.Г.М. Математические модели в физиологии растений / Дж.Г.М. Торнли; пер. с англ. Д.М. Гродзинского. – К.: Наук. думка, 1982. – 312 с.

7. Шишко Г. Г. Теплицы и тепличные хозяйства: справ. / [Шишко Г.Г., Потапов В.О., Сулима Л.Т. и др.]; под ред. Г.Г. Шишка. – К.: Урожай, 1993. – 421 с.

Проанализировано влияние факторов окружающей среды на жизнеобеспечение растений в системе растение - почва - воздух. Проведено моделирование основных факторов жизнеобеспечения растения, которые существенно влияют на его рост и урожайность.

Моделирование, коэффициент жизнеобеспечения растения, светообеспечение, влагообеспечение, теплообеспечение, обеспечение питательными веществами, газообеспечение.

The influence of environmental factors on plant life-support system in the plant - soil - air. The modeling of the main factors of life support plants that significantly influence growth and yield of plants.

Modelling, coefficient life support plants, light maintenance, providing moisture, heating supply, providing nutrients, gas-supply.

УДК 621.311.1:63

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РЕЗОНАНСНОЇ ОДНОПРОВІДНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

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

Розроблено математичну модель електромагнітних процесів, що відбуваються в резонансній однопровідній системі передачі електроенергії. За результатами математичного моделювання зроблено порівняльний аналіз встановлених хвиль напруг і струмів в однопровідній системі передачі електроенергії з навантаженням від 30 до 150 %. Показано найраціональніші значення основних параметрів резонансної однопровідної системи передачі електроенергії.

Трансформатор Тесли, резонанс, коливальний контур, передача електроенергії.

Історія вивчення однопровідних резонансних систем передачі електроенергії почалася ще в кінці XIX століття, в останні роки з'явився вели-

кий інтерес щодо вивчення теорії електромагнітних процесів у подібних системах. Однією з відомих однопровідних схем передачі електроенергії є схема зарядки ємнісного накопичувача енергії, запропонована С. В. Авраменком [3], а пояснення феномена однопровідної системи передачі електроенергії вперше було отримано в роботі [2]. Основна ідея принципу передачі енергії полягає в обґрунтуванні ідентичності тесловських схем заряду конденсатора схемі подвоєння Латура, теорія якої достатньо добре розроблена, що дало можливість провести ряд експериментів щодо удосконалення однопровідної схеми електропостачання.

Проте дослідження резонансних систем передачі електроенергії з двома високовольтними трансформаторами в режимах оптимального узгодження навантаження і довжини лінії проводилися недостатньо. За цією ж причиною моделювання електромагнітних процесів у резонансних однопровідних системах передачі електроенергії та розрахунок її основних параметрів є актуальною науковою задачею, розв'язку якої і присвячена стаття.

Мета досліджень – математичне моделювання електромагнітних процесів та розробка аналітичних залежностей ключових параметрів однопровідної системи передачі електроенергії з двома високочастотними резонансними трансформаторами.

Матеріали та методика досліджень. Для проведення розрахункових досліджень розглядається однопровідна система передачі електроенергії, принципова схема якої показана на рис. 1

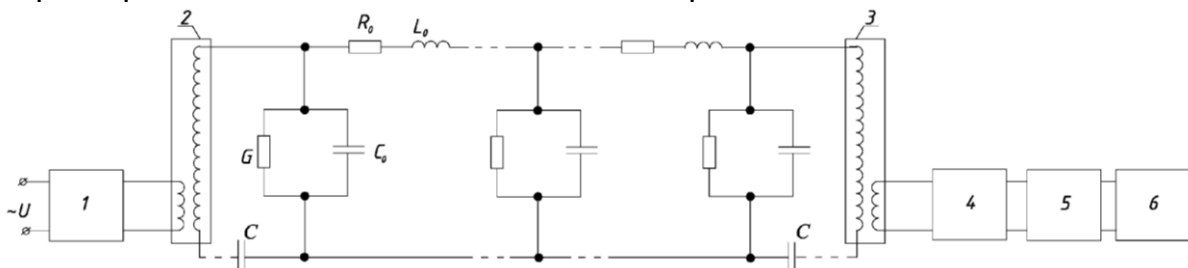


Рис. 1. Принципова схема резонансної однопровідної системи передачі електроенергії

Як видно із рис.1, однопровідна система передачі електроенергії складається із таких функціональних вузлів: транзисторного інвертора напруги (1), що живить передавальний високочастотний трансформатор (2), який 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).

Електроенергія, що передається, синусоїдного змінного струму промислової частоти (220 В, 50 Гц), перетворюється транзисторним інвертором (1) і налаштовується на резонансну частоту роботи системи. Далі надходить на первинну обмотку передавального високочастотного

трансформатора (2), вторинна високовольтна обмотка якого з'єднана одним проводом з високовольтною обмоткою приймального високочастотного трансформатора. Слід зазначити, що таке з'єднання обмоток утворює розімкнений контур, в якому проходить струм зміщення, який на відміну від струму провідності не пов'язаний з втратами енергії. Необхідною умовою при налаштуванні системи є відповідність частоти вихідної напруги транзисторного інвертора з резонансною частотою (350 кГц) розімкненого індуктивно-ємнісного контуру, який включає в себе лінію передачі електроенергії по одному проводу та багатовиткові обмотки приймального (3) і передавального (2) високочастотних трансформаторів.

Для спрощення розрахунків застосуємо метод дзеркального відображення в екіпотенціальній поверхні – земній площині. Еквівалентна схема такої системи показана на рис. 2.

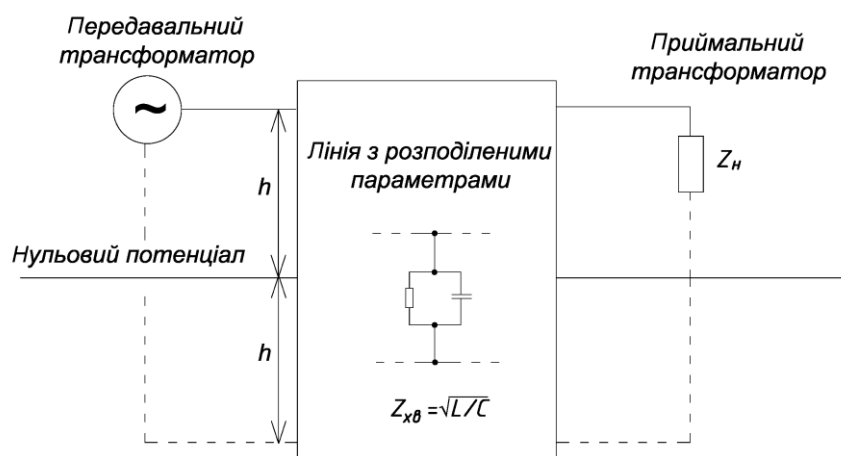


Рис. 2. Спрощена еквівалентна схема однопровідної системи передачі електроенергії

Електромагнітні процеси, що протікають в однопровідній лінії аналогічні електромагнітним процесам двохпровідної лінії з розподіленими параметрами з врахуванням параметрів навколишнього середовища (ємності та провідності між проводами). Поверхню земної площини прийнято за поверхню нульового потенціалу.

Результати досліджень. Однопровідна система передачі енергії складається з послідовно з'єднаних елементів довжиною dl опором $r_0 dl$, індуктивністю $L_0 dl$, причому в точках з'єднання двох суміжних елементів включені розгалуження з активною провідністю $G_0 dx$ та ємністю $C_0 dx$. Нехай u – напруга між проводами на початку елемента; du – зміна напруги по довжині цього елемента. Це зменшення викликано падінням напруги на опорі і падінням напруги на індуктивності:

$$-\frac{\partial u}{\partial t} dl = R_0 i dl + L_0 dl \frac{\partial i}{\partial t}, \quad (1)$$

де i – миттєве значення струму

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

складається зі струму провідності і струму зміщення між проводом і землею поверхнею:

$$-\frac{\partial i}{\partial t} dl = G_0 u dl + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} dl. \quad (2)$$

Розділивши рівняння на dl ми отримаємо систему диференціальних рівнянь:

$$-\frac{\partial u}{\partial t} = R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \quad (3)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial t} = G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (4)$$

Звідси випливає, що зменшення напруги відносно одиниці довжини складається з активного падіння напруги в опорі одиниці довжини і індуктивного падіння напруги в індуктивності одиниці довжини лінії. Зменшення струму відносно одиниці довжини складається зі струму провідності на протяжності одиниці довжини та із ємнісного струму в ємності на протяжності одиниці довжини лінії.

Диференціальне рівняння напруги і струму, в якій-небудь точці лінії, розташованій від початку на відстані l , можна записати в комплексній формі:

$$-\frac{d\dot{U}}{dl} = (R_0 + j\omega L_0) \dot{I} = Z_0 \dot{I}; \quad (5)$$

$$-\frac{d\dot{I}}{dl} = (G_0 + j\omega C_0) \dot{U} = Y_0 \dot{U}, \quad (6)$$

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

Як відомо, коефіцієнт поширення електромагнітної хвилі

$$\gamma = \alpha + j\beta, \quad (7)$$

де α – коефіцієнт згасання; $\beta = \frac{\omega}{c} = 2\pi f \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$, $\frac{\text{рад}}{\text{м}}$ – коефіцієнт фази,

$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість хвилі(світла).

Пропускна здатність однопровідної системи передачі залежить від її хвильового опору, що описується виразом:

$$\dot{Z}_{x\epsilon} = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} \approx 581, \text{ Ом.} \quad (8)$$

Довжина хвилі відповідно:

$$\lambda = \beta L, \text{ м,} \quad (9)$$

де L – довжина лінії, км

Для розрахунку параметрів реальної та ідеальної ліній у відносних одиницях необхідно виразити комплексні значення напруг та струмів через активну та реактивну потужність лінії:

$$\dot{I}_1 = (P_1 - jQ_1) / U_1; \quad (10)$$

$$U_2 = U_1 ch\gamma L - \frac{P_1 - jQ_1}{U_1^2 / \dot{Z}_{x\theta}} U_1 sh\gamma L. \quad (11)$$

Погонні параметри однопровідної системи можуть бути визначені шляхом застосування методу дзеркального відображення, тоді ємність напрямного каналу при відстані між проводами значно більше їх радіусів, описується таким співвідношенням:

$$C_1 = \frac{10^{-6}}{18 \ln \frac{2h}{r}} \approx 5,739 \cdot 10^{-9}, \text{ Ф/км}, \quad (12)$$

а погонна індуктивність:

$$L_1 = \left(\frac{1}{2} + 2 \ln \frac{2h}{r} \right) 10^{-4} \approx 1,936 \cdot 10^{-3}, \text{ Гн/км}. \quad (13)$$

Введемо значення базисної потужності реальної лінії:

$$S_{1БАЗ} = \frac{U_1^2}{\dot{Z}_{x\theta}}. \quad (14)$$

Відносні величини активної та реактивної потужності відповідно рівні:

$$P_{*1} = P_1 / S_{1БАЗ}; \quad (15)$$

$$Q_{*1} = Q_1 / S_{1БАЗ}. \quad (16)$$

Для деякої проміжної лінії, що знаходиться на відстані λ_x від початку лінії:

$$U_x = U_1 (\cos \lambda_x - Q_{*1} \sin \lambda_x) - jP_* \sin \lambda_x; \quad (17)$$

$$I_x = \frac{U_1}{\dot{Z}_{x\theta}} (P_* \cos \lambda_x - j(\sin \lambda_x + Q_{*1} \cos \lambda_x)), \quad (18)$$

$$S_{*x} = U_x I_x = P_* \pm jQ_{*x}. \quad (19)$$

де $P_* = P_{*1} = P_{*2}$.

Для деякої проміжної лінії, що знаходиться на відстані λ_x від кінця лінії:

$$U_x = U_2 (\cos \lambda_x - Q_{*2} \sin \lambda_x) - jP_* \sin \lambda_x, \quad (20)$$

$$I_x = \frac{U_2}{\dot{Z}_{x\theta}} (P_* \cos \lambda_x - j(\sin \lambda_x + Q_{*2} \cos \lambda_x)). \quad (21)$$

У лінії змінного струму з індуктивним опором, який впливає на передану потужність, активна потужність може бути передана при рівних за модулем напругах U_1 та U_2 . Це може бути досягнуто при фазовому зсуві δ між цими напругами. При цьому активна потужність передається від випереджуючого вектора до відстаючого:

$$P = P_{max} \sin \delta, \quad (22)$$

де $P_{max} = \frac{U_1 U_2}{\dot{Z}_{x\theta} \sin \lambda}$ – максимальна потужність, яка може бути передана лінією. У випадку навантаження лінії на еквівалентний опір, що рівний її

хвильовому опору, в лінії відсутні відбиті хвилі і по лінії без втрат передається тільки активна потужність, а реактивна потужність у всіх точках дорівнює нулю.

Еюра пропускнуї здатностї лінії за потужностю (рис.3) показала, що значення потужностї знижується по мірі збільшення довжини і при $\lambda = \pi/2$, максимальна потужність дорівнює натуральній $P_{НАТ} = \frac{U^2}{Z_{xe}}$. При збільшенні довжини максимальна потужність зростає, максимум якої, при $\lambda = \pi$. Далі по мірі збільшення довжини лінії процес періодично повторюється.

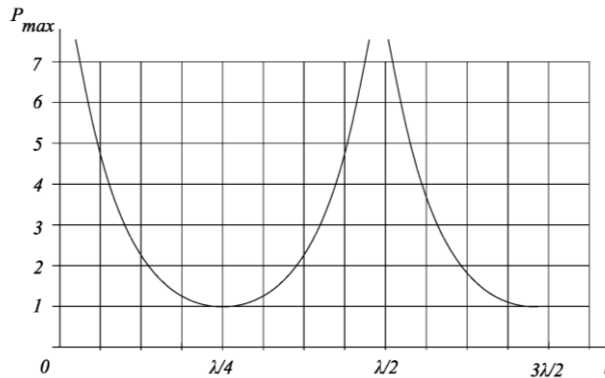


Рис. 3. Залежність максимальної пропускнуї потужностї лінії P_{max} від її довжини l

Для побудови графоаналітичних залежностей режимних параметрів лінії необхідно встановити початкові умови (параметри напруг на початку та в кінці лінії та активної потужностї на вході системи). Використавши рівняння (17), (18), (19) можна розрахувати режимні параметри для кожної точки лінії.

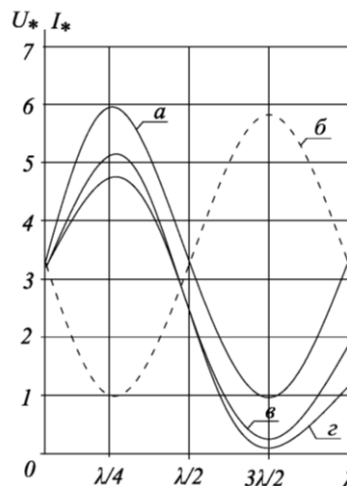


Рис. 4. Розподіл напруг і струмів в однопровідній системі

Режим узгодженого навантаження ($P=P_{нат}$) досягається при опорі навантаження в кінці лінії, рівному хвильовому опору лінії. Еюра розподілу струмів та напруг в такій лінії (рис. 4, а, б) показує, що напруги та струми в лінії на початку та в її кінці розподілені рівномірно. Режим малих на-

вантажень ($P=0,3P_{нат}$) характеризується підвищенням напруги зі збільшенням довжини лінії, а струми на кінці однопровідної системи менші від струмів на початку лінії (рис.4, в). Режим найбільших навантажень ($P=1,5P_{нат}$) характеризується значним зниженням напруги зі зростанням довжини лінії і збільшенням струму (рис. 4, г). Необхідно зазначити, що в такому режимі повинен відбуватися перетік реактивної потужності від кінця лінії до її початку ($Q_1 < Q_2$), а передавальний та приймальний резонансні трансформатори повинні забезпечити генерацію такої потужності. Без виконання цієї умови задану активну потужність при збереженні прийнятих значень напруг на кінцях лінії передати неможливо.

Висновки

Розроблена математична модель однопровідної системи передачі електроенергії дає можливість провести аналіз електромагнітних процесів і визначити найраціональніші їх величини на основі дослідження експериментального зразка. Результати моделювання показали, що отримані залежності максимального значення потужності залежно від довжини лінії досягають найбільшого значення при $\lambda = \pi$ та натурального значення при $\lambda = \pi/2$. Проведено порівняльний аналіз однопровідної системи передачі електроенергії на основі побудованих епюр напруг та струмів у різних навантажувальних режимах лінії від $0,3P_{нат}$ до $1,5P_{нат}$, який дає можливість встановити її параметри залежно від навантаження.

Розроблена математична модель та аналітичні залежності можуть бути використані при проектуванні та вдосконаленні однопровідних систем передачі електроенергії резонансного типу.

Список літератури

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л. А. Бессонов – М.: Высш. шк., 1986. – 212 с.
2. Волков И.В., Тесловские процессы в высоковольтных высокочастотных электрических цепях / И.В. Волков, И.В. Пентегов // Технічна електродинаміка: Тем. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – К.: ІЕД НАНУ, 2000. – Ч.1. – С. 7–11.
3. Стребков Д.С. Резонансные методы передачи электрической энергии / Д.С. Стребков, А.И. Некрасов. – М: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 304 с.
4. R. Fano, L.J. Chu, and R.B. Adler, Electromagnetic Fields, Energy and Forces, Wiley, 1960. – P. 257 – 259.
5. I.V. Pentegov, Theory of Tesla processes in the charging of capacitive energy storages, Electrical Technology, N2, 1996. – P. 119–128.

Разработана математическая модель электромагнитных процессов, происходящих в резонансной однопроводной системе передачи электроэнергии. По результатам математического моделирования сделан сравнительный анализ установленных волн напряжений и токов в однопроводной системе передачи электроэнергии с нагрузкой от 30 до 150 %. Показаны наиболее рациональные значения основных параметров резонансной однопроводной системы передачи электроэнергии.

Трансформатор Теслы, резонанс, колебательный контур, передача электроэнергии.

This work devoted for development electromagnetic processes' mathematical model occurring in the single-wire resonance transmission system. From results of mathematical modeling made comparative analysis, shown the waves of voltage and current in single-wire transmission system at the load from 30 to 150%. Showing most rational values of the main parameters resonance single-wire transmission system.

Tesla transformer, resonance, oscillation circuit, power transmission.

УДК 621.327.539

ВПЛИВ ЧАСТОТИ СТРУМУ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРОБАРОК

О.Ю. Синявський, кандидат технічних наук

Проведено дослідження впливу частоти струму на кутову швидкість, технологічні та енергетичні характеристики дробарок. Встановлено залежності продуктивності, питомих витрат енергії та модуля помелу дробарок від частоти струму.

Дробарка, електропривод, частота струму, продуктивність, питомі витрати енергії, модуль помелу.

Зміна частоти струму впливає на кутову швидкість двигуна, яка, в свою чергу, обумовлює зміну технологічних характеристик робочих машин.

У результаті проведених проф. І.І. Ревенком експериментальних досліджень встановлено, що швидкість молотків є найсуттєвішим фактором подрібнення у молотковій дробарці [3]. Зростання кутової швидкості дробильного ротора підвищує інтенсивність подрібнення внаслідок збільшення швидкості деформування і руйнування частинок перероблюваного матеріалу, які зі зростанням деформації поводять себе як більш крихкі тіла. Однак практичне застосування підвищення інтенсивності подрібнення за рахунок збільшення швидкості дробильного ротора обмежується пропускнуою здатністю встановлених решіт. Тому у дії кутової швидкості дробильного ротора на процес подрібнення можна виділити три характерні періоди [3].

1. Початковий, при якому зростання швидкості обумовлює інтенсивне підвищення подрібнювальної дії молоткового ротора, внаслідок чого знижується енергоємність процесу, а продуктивність зростає.

2. Найвигідніший для робочого процесу, який відповідає зміні швидкості у межах від мінімального значення енергоємності до моменту максимальної продуктивності дробарки. Дробарка працює з високою продук-