

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ АКТИВНОГО ОПОРУ ПЕРВИННОЇ ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА ТЕСЛИ

В.В. Василенко, доктор технічних наук

В.М. Пушилін, старший викладач

*В.М. Комаров, аспірант**

Розглянуто особливості розрахунку активного опору первинної обмотки трансформатора Тесли з урахуванням поверхневого ефекту (скін-ефекту), що має місце в провіднику, через який проходить високочастотний струм. Показано, що при розрахунку активного опору цієї обмотки враховується не площа поперечного перерізу, а площа поверхневого скін-шару, товщина якого визначається залежно від частоти струму, що протікає через первинну обмотку, та питомої провідності її матеріалу.

Трансформатор Тесли, скін-ефект, магнітна індукція.

Як відомо первинна обмотка трансформатора Тесли виконується за допомогою провідника великого перерізу для зменшення її активного опору з метою отримання максимальної величини струму та магнітного потоку.

Враховуючи те, що змінний струм високої частоти розподіляється в провіднику нерівномірно по всьому поперечному перерізу, а тільки в поверхневому шарі провідника, провідник, як правило виконується у вигляді мідної трубки. Проте при розрахунку активного опору трубки треба враховувати не всю товщину трубки, а тільки товщину так званого скін-шару, по якому протікає струм високої частоти. На визначенні товщини цього скін-шару й оснований методика розрахунку активного опору первинної обмотки трансформатора Тесли.

Мета роботи – обґрунтування методики розрахунку активного опору первинної обмотки трансформатора Тесла.

Матеріали та методика досліджень: результати дослідження процесів, що відбуваються в первинній обмотці трансформатора Тесли при живленні її змінним струмом високої частоти.

Результати досліджень. Якщо крізь циліндричний провідник пропустити електричний струм, то навколо нього виникне магнітне поле, силові лінії якого є концентричними колами з центром на осі провідника. При підвищенні сили струму збільшиться магнітна індукція, а форма силових ліній магнітного поля залишиться без змін.

Згідно із законом електромагнітної індукції змінне магнітне поле створює електричне індукційне поле $rotE = -\frac{\partial B}{\partial t}$, силові лінії якого

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

©В.В. Василенко, В. М. Пушилін, В.М. Комаров, 2012

являють собою замкнуті криві навколо ліній індукції магнітного поля. Вектор напруженості індукційного поля в безпосередній близькості біля осі провідника направлений протилежно вектору напруженості електричного поля, що створює струм, а віддалено від осі – збігається з ним. Як наслідок густина струму зменшується навколо осі і збільшується біля поверхні провідника, тобто з'являється явище скін-ефекту.

В однорідному провіднику густина струму однакова при проходженні постійного струму, а неоднорідність розподілення спостерігається при проходженні змінних струмів. Змінний струм високої частоти практично концентрується в тонкому поверхневому шарі – звідси це явище отримало назву скін-ефект або поверхневий ефект. Пояснюється це виникненням вихрового електричного поля. Електричний струм на високих частотах проходить практично через поверхневий шар провідника, це призводить до зменшення задіяного перерізу провідника і відповідно до збільшення його опору.

Як відомо, згідно з першим законом Максвелла для провідника

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J}, \text{ або } \operatorname{rot} \frac{\vec{B}}{\mu_0} = \vec{J}, \text{ а отже}$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{J}. \quad (1)$$

Продиференціювавши обидві частини рівняння (1), одержимо:

$$\operatorname{rot} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \mu_0 \gamma \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \text{ або } - \operatorname{rot} \cdot \operatorname{rot} \vec{E} = \mu_0 \gamma \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \text{ а враховуючи, що}$$

$$- \operatorname{rot} \cdot \operatorname{rot} \vec{E} = \nabla \nabla \vec{E} = \nabla^2 \vec{E}, \text{ остаточно отримаємо}$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \gamma \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \quad (2)$$

Нехай для спрощення розв'язання струм тече по однорідному нескінченному провіднику, що займає напівпростір $y > 0$ вздовж осі X. Поверхня провідника є площиною $y = 0$. Таким чином,

$$j_x = j_x(y, t); j_y = j_z = 0; E_x = E_x(y, t); E_y = E_z = 0. \quad (3)$$

Тоді

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} = \mu_0 \gamma \frac{\partial E_x}{\partial t}. \quad (4)$$

Оскільки в цьому рівнянні всі величини гармонічно залежать від t , то:

$$E_x(y, t) = E_0(y) e^{i\omega t}. \quad (5)$$

Підставивши (5) в рівняння (4), отримаємо $E_0(y)$:

$$\frac{\partial^2 E_0}{\partial y^2} = i\gamma\mu_0\omega E_0. \quad (6)$$

Загальний розв'язок рівняння (6) має вигляд:

$$E_0 = A_1 e^{-ky} + A_2 e^{-ky}, \quad (7)$$

$$\text{де } k = \sqrt{i\gamma\mu_0\omega} = \alpha(1+i), \quad \alpha = \sqrt{\frac{\gamma\mu_0\omega}{2}}$$

Тоді загальний розв'язок рівняння буде:

$$E_0 = A_1 e^{-\alpha y} e^{-i\alpha y} + A_2 e^{\alpha y} e^{i\alpha y} \quad (8)$$

Віддаляючись від поверхні провідника ($y \rightarrow \infty$) другий доданок необмежено підвищується, що є фізично недопустимою ситуацією. Відповідно $A_2 = 0$ і як фізичне рішення залишається тільки перший доданок. Тоді рішення задачі описується рівнянням:

$$E_0 = A_1 e^{-\alpha y} e^{i(\omega t - \alpha y)} \quad (9)$$

Взявши дійсну частину від цього рівняння і переходячи за допомогою співвідношення $j = \gamma E_K$ густини струму, отримуємо:

$$j_x(y, t) = j_0 A_1 e^{-\alpha y} \cos(\omega t - \alpha y) \quad (10)$$

Прийнявши до уваги, що $j_x(0, 0) = j_0$ – амплітуда струму на поверхні провідника, приходимо до такого розподілу об'ємної густини струму в провіднику:

$$j_x(y, t) = j_0 e^{-\alpha y} \cos(\omega t - \alpha y) \quad (11)$$

Визначимо товщину скін-шару, тобто товщину шару провідника, по якому проходить високочастотний струм,

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\gamma \mu_0 \omega}} \quad (12)$$

де $\gamma = \rho^{-1}$, $\frac{Cm}{m}$ – питома провідність; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$, $\frac{Гн}{м}$ – магнітна проникність вакууму; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, $рад/с$ – кутова частота струму.

Питомий опір дорівнює:

для міді: $\rho_{Cu} = 0,0175 \cdot 10^{-6}$ Ом·м;

для алюмінію: $\rho_{Al} = 0,029 \cdot 10^{-6}$ Ом·м;

для сталі: $\rho_{Fe} = 0,2 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Тоді питома провідність для цих матеріалів буде:

для міді: $\gamma_{Cu} = 57,43 \cdot 10^6$ См/м;

для алюмінію: $\gamma_{Al} = 34,483 \cdot 10^6$ См/м;

для сталі: $\lambda_{Fe} = 5 \cdot 10^6$ См/м.

Очевидно, для кожного металу рівняння (12) можна спростити, підставивши відповідне значення питомої провідності γ та магнітної проникності. Зокрема для міді це рівняння спрощується до прямої залежності від циклічної частоти коливального процесу, f :

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\gamma_{Cu} \cdot \mu_0 \cdot 2\pi \cdot f}} = \frac{0,0664}{\sqrt{f}}, м \quad (13)$$

Тоді, товщина скін-шару Δ у мідному провіднику може бути визначена згідно з рівнянням (13) для будь-якої частоти струму.

Значення товщини скін-шару для мідного провідника при частотах струму в діапазоні 50 Гц...100 МГц наведено в таблиці.

Залежність товщини скін-шару від частоти струму в провіднику

Товщина скін шару, мм	9,4	2,1	0,66	0,21	0,1	0,066	0,021	0,0021
Частота, кГц	0,050	1	10	100	426,3	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^6$

Знаючи товщину скін-шару, розраховується його площа як різниця площі перерізу цілого проводу, S_1 , і площі перерізу його частини без скін-шару S_2 :

$$S_{\Delta} = S_1 - S_2 = \frac{\pi}{4} [D_1^2 - (D_1 - 2\Delta)^2] \quad (14)$$

Наприклад, при частоті 426,3 кГц та діаметрі трубки $12 \cdot 10^{-3}$ м і товщині скін -шару $0,1 \cdot 10^{-3}$ м маємо розрахункову площу перерізу поверхневого скін – шару рівну:

$$S_{\Delta} = 3,7385 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2.$$

Тоді, маючи довжину проводу, рівну 3 м, отримуємо активний опір первинної обмотки :

$$R = \frac{\rho l}{S} = 0,01404, \text{ Ом.} \quad (15)$$

Висновки

При розрахунку активного опору первинної обмотки трансформатора Тесли, виконаної у вигляді металевої трубки, враховується не площа поперечного перерізу цієї трубки, а площа поверхневого скін- шару, товщина якого визначається залежно від частоти струму, що протікає через первинну обмотку, та питомої провідності її матеріалу.

Список літератури

1. Алабина Ю.Ф. Электрическое поле в задаче о скин-эффekte / Алабина Ю.Ф. – Архангельск: Изд-во Поморского ун-та, 2008 – 406 с.
2. Калашников С.Г. Электричество / Калашников С.Г. – М.:Наука, 1985. – 576 с.
3. Нейман Л.Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах / Нейман Л.Р.– М.: Госэнергоиздат, 1949.–190 с.
4. Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники / Л. Р.Нейман, К.С. Демирчан.– Л.: Энергия, 1967. – Т. 1.– 522 с; Т. 2.– 408 с.

Рассмотрены особенности методики расчета активного сопротивления первичной обмотки трансформатора Теслы с учетом поверхностного эффекта (скин-эффекта), что имеет место в проводнике, через который проходит высокочастотный ток. Показано, что при расчете активного сопротивления этой обмотки учитывается, не площадь поперечного сечения, а площадь поверхностного скін - слоя, толщина которого определяется в зависимости от частоты тока, протекающего через первичную обмотку, и удельной проводимости ее материала.

Трансформатор Тесла, скін-ефект, магнитная индукция.

The features methods' calculating the resistance primary winding of the transformer Tesla considering the surface effect (skin-effect), which takes place in the conductor through which high-frequency current. It is shown that the resistance calculation of the windings is taken into account, not cross sectional area and surface area of the skin - the layer thickness is determined

depending on the frequency of current, flowing through the primary winding, and the specific conductivity of the material.

Tesla coil, skin-effect, magnetic induction.

УДК 631.03.007

АНАЛОГИ ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА ІЗ ВИКОПНОЇ СИРОВИНИ

***В.М. Поліщук, кандидат технічних наук
С.Є. Тарасенко, кандидат технічних наук
О.В. Поліщук, аспірант****

Проаналізовано аналоги дизельного палива, що виробляються із викопної сировини. Розглянуто їх переваги і недоліки. Проведено оцінку технологій їх виробництва та використання.

Диметиловий ефір, синтетичне дизельне паливо, E-diesel, газодизельний двигун, сумішеве паливо.

Оскільки розвіданих запасів нафти залишилось на 45 років видобування [6], перед людством постала нагальна потреба шукати заміники нафтових палив: бензину, дизельного палива, гасу. Для сільськогосподарського виробництва важливим є постачання дизельного палива, адже більшість сільгосптехніки має дизельні двигуни. Вже розроблений і виробляється аналог дизельного палива із відновлюваних ресурсів – біодизель. Однак існує можливість виготовляти заміники дизельного палива із традиційних ресурсів: вугілля і природного газу, запасів яких дещо більше, порівняно із запасами нафти.

До таких палив належать синтетичне дизельне паливо, диметиловий ефір та сумішеві дизельні палива.

Метою досліджень є аналіз можливості заміни нафтового дизельного палива іншими видами палив, що виготовляються із викопної сировини.

Результати досліджень. Диметиловий ефір (ДМЕ) являє собою інертний газ, який зріджується при невеликому тиску. ДМЕ в зрідженому вигляді нагадує воду. Він добре розпилюється, що призводить до ефективного згорання палива; має високе цетанове число (55–60), що знижує період затримки займання; оскільки практично не містить сірки, то рівень викидів її оксидів дуже низький; має хороші пускові характеристики в холодний час.

Основною сировиною для виробництва ДМЕ є природний газ.

*Науковий керівник – доктор технічних наук, професор В.О. Дубровін

© В.М. Поліщук, С.Є. Тарасенко, О.В. Поліщук, 2012