

Проанализированы энергетические преобразования в автономном электромеханическом комплексе с компенсированными асинхронными машинами, проведено сравнение основных энергетических показателей автономного асинхронного генератора и компенсированного автономного асинхронного генератора при работе на серийный асинхронный двигатель в составе автономного электромеханического комплекса.

Автономный электромеханический комплекс, компенсированный автономный асинхронный генератор, компенсированный асинхронный двигатель, энергетические преобразования.

The energy conversion are analysed in the autonomous electromechanical complex with the compensated asynchronous machines. The comparison of main energy indication of autonomous asynchronous generator and compensated autonomous asynchronous generator is conducted during work on a serial asynchronous engine in an autonomous electromechanical complex.

The autonomous electromechanical complex, compensated autonomous asynchronous generator, compensated asynchronous engine, the energy conversion

УДК 621.365

ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗРАХУНКОВОЇ МОДЕЛІ ЦИЛІНДРИЧНОГО ІНДУКТОРА ДЛЯ НАГРІВУ ФЕРОМАГНІТНИХ ТРУБ

***І.П. Кондратенко, доктор технічних наук
А.О. Березюк, аспірант****

Проведено порівняльний аналіз результатів аналітичних розрахунків циліндричного індуктора із завантаженням у вигляді феромагнітної труби та результатів моделювання електрофізичних процесів, які протікають в індукторі методом скінченних елементів за допомогою програмного середовища COMSOL Multiphysics.

Циліндричний індуктор, індукційний нагрів, феромагнітне завантаження.

Математичне моделювання пристроїв індукційного нагріву є однією з поширених традиційних задач електротехніки. Останні досягнення електротехнічної науки базуються на використанні чисельних методів розрахунку на основі методу скінченних елементів, недоліком яких є

*Науковий керівник – доктор технічних наук І.П. Кондратенко

© І.П. Кондратенко, А.О. Березюк, 2012

необхідність кожного разу визначати конкретні геометричні параметри розрахункової моделі, що ускладнює отримання узагальнюючих результатів. Тому аналітичні методи розрахунку систем індукційного нагріву залишаються актуальними повсякчас.

Відомі аналітичні методи широко використовують теорію електричних і магнітних кіл, а також теорію електромагнітного поля [2].

У роботі [1] наведено метод розрахунку електромагнітного поля в циліндричному індукторі скінченної довжини з періодизацією граничних умов, при яких на границях області векторний магнітний потенціал приймався рівним нулю.

Геометричні розміри області періодизації визначались з припущення, що векторний магнітний потенціал на відстані одного діаметра індуктора дорівнював нулю. Насправді таке твердження потребує уточнення.

Мета роботи полягає у визначенні геометричних параметрів області періодизації з застосуванням методів чисельного розрахунку.

Матеріали та методика дослідження. Припущення, за яких було отримано розв'язок задачі розрахунку електромагнітного поля в [1], повинні бути збережені для розрахункової моделі при чисельному моделюванні, а саме: лінійні розміри феромагнітного завантаження (труби) набагато більші за довжину індуктора і довжина індуктора більша його діаметра щонайменше втричі ($a > 3 \cdot d_1$). Питома електропровідність в обох випадках приймається рівною і сталою за об'ємом феромагнітного завантаження. Суттєва відмінність аналітичної і чисельної моделей полягає в завданні струмового навантаження. Так, при аналітичному розв'язку індуктор був представлений струмовим шаром на внутрішній поверхні циліндричного соленоїда. При чисельному моделюванні струмове навантаження будемо задавати зосередженим в області, яка характеризується нульовою електропровідністю, магнітною проникністю, рівною магнітній постійній та рівномірним розподілом густини струму. Причому товщина області зі струмом вибирається рівною реальній товщині провідника, з якого намотується соленоїд. Для зіставлення результатів аналітичних і чисельних розрахунків густину струму в області зі струмом задаємо з урахуванням результатів аналітичного методу:

$$J = \frac{I w}{a \Delta}, \quad (1)$$

де I – струм у витках індуктора, А; w – кількість витків; a – довжина струмової області, м; Δ – товщина області, м. Зауважимо, що особливістю аналітичного методу розрахунку енергетичних параметрів циліндричного індуктора [1] є режим живлення від джерела напруги. Тому розрахунок відбувається за методом поступового наближення через визначення на кожному кроці величини струмового навантаження і відповідної магнітної проникності. Причому для визначення струмового навантаження за заданою величиною напруги живлення необхідним є визначення активного опору провідників індуктора включно з додатковим опором, який пов'язують з додатковими втратами в обмотці з масивними провідниками.

При чисельному моделюванні будемо виходити з режиму живлення від джерела струму, але густину струму будемо визначати за величиною струму, який попередньо визначено аналітично, тобто з урахуванням активного опору обмотки індуктора. Таким чином, визначені при чисельному моделюванні енергетичні параметри індуктора будуть торкатися лише потужності втрат безпосередньо в феромагнітному завантаженні.

Для аналітичного розрахунку електромагнітного поля в [1] магнітна проникність приймалась постійною по всьому об'єму феромагнітного завантаження і розраховувалась за середнім значенням напруженості магнітного поля на поверхні труби.

Методи чисельного моделювання дозволяють враховувати нелінійну залежність магнітної проникності, яку для цього дослідження будемо приймати такою:

$$\mu = \frac{830}{1 + 0,025 B_z^9}. \quad (2)$$

Для осесиметричного випадку електромагнітне поле будемо досліджувати відносно векторного магнітного потенціалу за таким векторним рівнянням:

$$(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)\mathbf{A} + \nabla(\mu\nabla\mathbf{A}) - \sigma\nabla\mathbf{A} = \left(\frac{\sigma V_{loop}}{2\pi r} + J^e_\varphi\right), \quad \mathbf{A} = A_\varphi \mathbf{e}_\varphi, \quad (3)$$

де σ – питома електропровідність матеріалу, Cm/m ; μ – абсолютна магнітна проникність середовища ($\mu = \mu_0\mu_r$); ε – абсолютна діелектрична проникність середовища ($\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$); ω – обертова частота, rad/c .

Чисельний розв'язок рівняння (3) реалізовано в розрахунковому середовищі Comsol (рис.1) методом скінченних елементів. Розрахункова модель була побудована за допомогою модуля AC/DC Module в розділі Quasi-Static, Magnetic в підрозділі Azimuthal Induction Currents, Vector Potential з урахуванням гармонічного аналізу – Time-harmonic analysis.

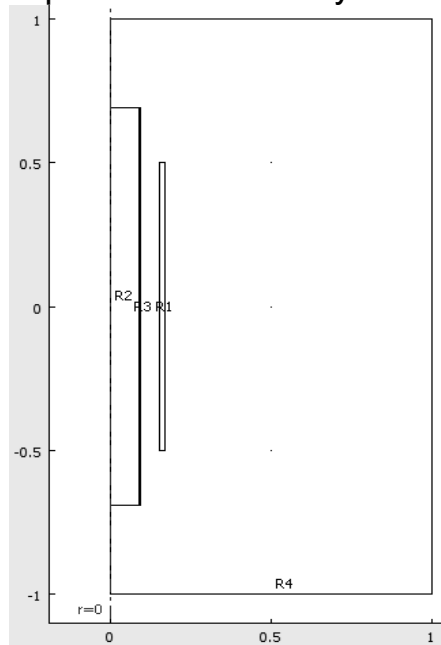


Рис. 1. Область для розрахунку електромагнітної задачі

Для коректного розв'язку електромагнітної задачі на границях областей задавались такі умови:

- умова азимутальної симетрії відносно осі, $r = 0$;
- умова магнітної ізоляції на зовнішніх границях, $A_\varphi = 0$;
- на всіх інших границях автоматично присвоюється умова неперервності (на границях індуктора і труби), $\mathbf{n}(\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = 0$,

де \mathbf{H} – напруженість магнітного поля, A/m ; \mathbf{n} – вектор зовнішньої нормалі.

Розрахункова область розбивалась на досить велику кількість кінцевих елементів. Кінцево-елементна сітка на розрахунковій області індуктора наведена на рис. 2. Так, для отримання більш точного результату в області, що займає тіло труби, на глибину проникнення електромагнітної хвилі було розміщено близько 10 кінцевих елементів. У нашому випадку при роботі індуктора на промисловій частоті $f = 50 \text{ Гц}$ глибина проникнення електромагнітної хвилі у феромагнітному середовищі $\delta = 7 \text{ мм}$.

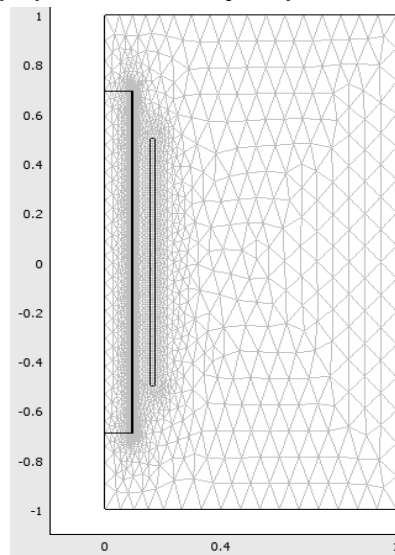


Рис. 2. Кінцево-елементна сітка на розрахунковій області індуктора

Результати дослідження. Картина розподілу електромагнітного поля за довжиною вантаження наведена на рис. 3,а, з якого видно, що поле на кінцях індуктора швидко загасає. Так, на відстані $l = a + 2,5r_1$ від торця індуктора величина індукції відрізняється від регулярної зони більш ніж на порядок. Оскільки потужність джерел теплоти залежить від індукції за квадратичним законом, то в зоні торця потужність тепловиділень буде зменшена у порівнянні з регулярною зоною, відповідно, на два порядки (рис. 3,б).

Для цієї розрахункової моделі задавались такі геометричні параметри: довжина індуктора $a = 1 \text{ м}$; діаметр індуктора $d = 0,31 \text{ м}$; діаметр труби (завантаження) $d = 0,194 \text{ м}$; товщина стінки труби $\Delta = 0,07 \text{ м}$. Електрофізичні параметри завантаження: питома електропровідність $\sigma = 3,5 \cdot 10^6 \text{ НВ/м}$; магнітна проникність феромагнітного завантаження описувалась залежністю (2).

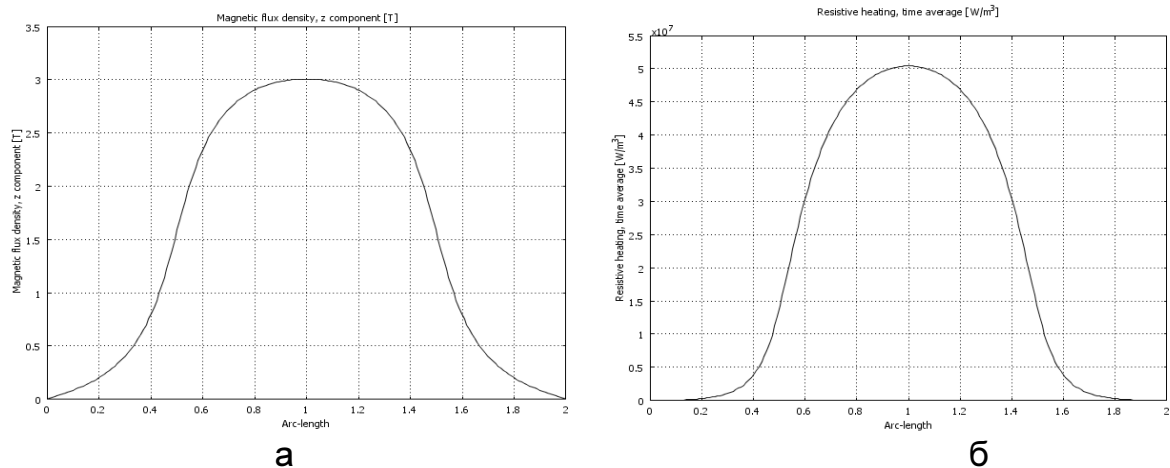


Рис. 3. Картина розподілу електромагнітного поля (а) та потужності тепловиділень (б) за довжиною завантаження

Для порівняння результатів чисельного та аналітичного розрахунків, значення струмового навантаження, що було розраховано на підставі аналітичного методу розрахунку, передавалось як вихідне значення в чисельне моделювання за умови завдання просторового періоду за формулою:

$$l = a + 2,5r_1. \quad (4)$$

Отримані результати збігалися в обох випадках.

Також були проведені розрахунки і для підвищених частот при інших геометричних розмірах індуктора та завантаження. Так, при частотах 0,5–2 кГц для всього діапазону геометричних параметрів індуктора, завдання просторового періоду за допомогою виразу (4) при аналітичному розрахунку дало можливість отримати повністю ідентичні результати чисельних розрахунків.

Висновки

У роботі виконано порівняння аналітичного і чисельного методів розрахунку циліндричного індуктора скінченних розмірів з додержанням сформульованих вище припущень. Встановлено, що при завданні просторового періоду як $l = a + 2,5r_1$, результати розрахунку енергетичних параметрів індуктора аналітичним і чисельним методом збігаються в обох випадках з великою точністю для широкого діапазону геометричних параметрів індукційних систем.

Список літератури

1. Кондратенко І.П. Енергетичні характеристики і електричні параметри індукторів для нагріву пучка феромагнітних труб / І.П. Кондратенко, А.П. Ращепкін, А.О. Березюк // Вісник КДУ ім. Михайла Остроградського. – 2010. – №3, ч. 2. – С.62.
2. Немков В.С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.

Проведён сравнительный анализ результатов аналитических расчетов цилиндрического индуктора с загрузкой в виде ферромагнитной трубы и результатов моделирования электрофизических процессов, которые протекают в индукторе методом конечных элементов с помощью программной среды COMSOL Multiphysics.

Цилиндрический индуктор, индукционный нагрев, ферромагнитная загрузка.

In this paper a comparative analysis the results of analytical calculations of cylindrical inductor which loaded by ferromagnetic pipe and the modeling results of electrophysical processes, which occur in the inductor by finite element method using the software COMSOL Multiphysics has been proved.

Cylindrical inductor, induction heating, ferromagnetic loading.

УДК 621.314.58

СИСТЕМНО-АНАЛІТИЧНІ ЗАСАДИ ПРОЕКТУВАННЯ ВІТРО-СОНЯЧНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

***В.В. Каплун, доктор технічних наук
Київський національний університет технологій та дизайну
В.В. Осипенко, кандидат технічних наук
С.С. Яцик, аспірант *
Національний університет біоресурсів
і природокористування України***

Запропоновано задачу прогнозу моментів переведення систем із активного стану в пасивний і навпаки вирішувати за допомогою індуктивного алгоритму прогнозування так званих «рідкісних» явищ. Сформульовано постановку задачі й наведено основні етапи її розв'язання.

Вітро-сонячна система електроживлення, інформаційний моніторинг, прогнозування, індуктивний метод, зовнішні критерії оптимальності.

Сучасні тенденції розвитку малої електроенергетики передбачають використання різних класів джерел електроенергії, що у загальному випадку поділяються на дві основні групи – традиційні та поновлювані [4]. Введення в склад автономної системи різномірних джерел електроенергії, що використовують різні фізичні явища у процесі

* Науковий керівник – доктор технічних наук В.В. Каплун

© В.В. Каплун, В.В. Осипенко, С.С. Яцик, 2012