

А.А. Цыганкова, канд. техн. наук

Национальный университет пищевых технологий,
ул. Владимирская, 68, Киев-33, 01033, Украина

Расчет магнитного поля в рабочей зоне электродинамического тормоза при неподвижном роторе

Приведены результаты расчета угловой и осевой компонент вектора напряженности магнитного поля для различных значений относительной магнитной проницаемости материала диска. Показано, что в рабочей зоне электродинамического тормоза на поверхности диска радиальная компонента вектора напряженности магнитного поля отсутствует, а угловой компонент при относительной магнитной проницаемости материала диска, большей 10, можно пренебречь. Библиограф. 4, рис. 3.

Ключевые слова: электродинамический тормоз, напряженность магнитного поля, магнитный потенциал.

G.A. Tsygankova

National University of Food Technologies,
Volodymyrska str., 68, Kyiv-33, 01033, Ukraine

Calculating of magnetic field in a working zone of an electrodynamic brake with static rotor

The results of the calculation of the angular and axial vector components of the magnetic field for different values of the relative magnetic permeability disc material are given. It is shown that in the working area of the electrodynamic brake on the surface of the disk a radial component of the vector of intensity of magnetic field is absent, and the angular component, at a relative magnetic permeability of the disc material more than 10, can be neglected. References 4, figures 3.

Key words: electrodynamic brake, intensity of a magnetic field, magnetic potential.

Надійшла 13.04.2016

Received 13.04.2016

УДК 621.313.322-81

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РАДІАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИЛ ПРИ РОЗПРЕСУВАННІ КРАЙНІХ ЛИСТІВ ОСЕРДЯ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

А.М. Мельник, асп.

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна.

e-mail: ied10@ukr.net

ORCID ID:* <http://orcid.org/0000-0002-7492-3110>

Проведено математичне моделювання електромагнітних вібробуджуючих сил при появі розпресування крайніх листів осердя статора потужного турбогенератора на прикладі серійного турбогенератора типу ТГВ-200-2 потужністю 200 МВт. Показано, що при появі ослаблення листів крайнього пакета шихтованого осердя статора турбогенератора магнітний стан погіршується, а максимальне значення амплітуди магнітних сил зменшується в 1,26 разу, що необхідно враховувати при вимірюванні вібрацій. Спектральний аналіз тензора магнітного натягу при різних відстанях між листами показав зменшення перших трьох гармонік амплітуд основної частоти магнітних коливань на 12...30 %. Библиограф. 4, рис. 5.

Ключові слова: турбогенератор, математичне моделювання, електромагнітні сили, магнітна проникність, тензор магнітного натягу.

Вступ. Останнім часом все більше набуває актуальності проблема надійності осердя статорів турбогенераторів. Досить частим дефектом осердя статорів потужних турбогенераторів є порушення щільності пресування крайніх пакетів шихтованого осердя. Головним чинником це пов'язано зі збільшенням кількості турбогенераторів, що відпрацювали свій термін служби і працюють з підвищеним коефіцієнтом потужності в режимах споживання реактивної потужності. Ці фактори сприяють ослабленню щільності пресування торцевих зон осердь, що призводить до виникнення дефектів. Найчастіше ці дефекти виявляються у процесі випробувань або при планових ремонтах. Ослаблення пресування та розпушення зубців

у торцевій зоні призводить до появи вібрацій листів активної сталі під дією аксіальних знакозмінних електродинамічних зусиль, що являє собою велику небезпеку та обмежує працездатність турбогенератора [1, 3, 4].

Головною особливістю діагностики розпресування є те, що неможливо наперед визначити місце дефекту та встановити давач для контролю стану осердя [2]. Метою цієї статті є визначення стану пресування крайніх листів активної сталі осердя статорів потужних турбогенераторів (ТГ) на основі аналізу розподілу радіальних електромагнітних сил вздовж розточки статора. Основним методом, який використовувався при розрахунку електромагнітного поля, є метод скінченних елементів. Для досягнення поставленої мети було розроблено та чисельно реалізовано польову математичну модель електромагнітних вібробуджуючих сил крайніх листів активної сталі осердя статора турбогенератора.

Математична модель. На рис. 1 зображено модель крайнього листа активної сталі осердя статора турбогенератора. Геометричні розміри листа відповідають турбогенератору типу ТГВ-200-2.

Рівняння електромагнітного поля в листі активної сталі осердя статора запишемо таким чином. Припускаючи постійність магнітної проникності μ заліза осердя статора, величина якої визначається насиченням заліза статора основним магнітним потоком ТГ, і виконуючи диференціальну операцію *rot* над першим рівнянням Максвелла, отримаємо

$$\text{rot rot } \vec{H} = \text{rot } \vec{J}, \quad (1)$$

де \vec{H} – вектор напруженості магнітного поля; \vec{J} – вектор щільності струму. Оскільки

$\text{rot rot } \vec{H} = \text{grad div } \vec{H} - \Delta \vec{H}$, а з третього рівняння Максвелла при постійності μ маємо

$\text{div } \vec{H} = 0$, то рівняння (1) спрощуємо:

$$-\Delta \vec{H} = \text{rot } \vec{J}. \quad (2)$$

Для нерухомих середовищ \vec{J} можна виразити таким чином:

$$\text{rot } \vec{J} = \gamma \text{rot } \vec{E} + \text{rot} \left(\vec{J}_{\text{стор}} \right) = -\mu \gamma \partial \vec{H} / \partial t + \text{rot} \left(\vec{J}_{\text{стор}} \right), \quad (3)$$

де γ – електропровідність заліза статора; $\vec{J}_{\text{стор}}$ – густина сторонніх струмів, яка характеризує джерела поля у крайньому пакеті статора при дії магнітного потоку в торцевій зоні ТГ.

Підставляючи вираз (3) у рівняння (2), отримуємо векторне диференціальне рівняння поля:

$$\Delta \vec{H} - \mu \gamma \partial \vec{H} / \partial t = -\text{rot} \left(\vec{J}_{\text{стор}} \right). \quad (4)$$

Припустимо, що в осьовому напрямі усі вектори поля змінюються за експоненціальним законом з глибиною проникнення $\Delta = \sqrt{2 / \omega \mu \gamma}$, $\omega = 2\pi f$, де f – частота напруги живлення. В результаті вектор \vec{H} можна представити як

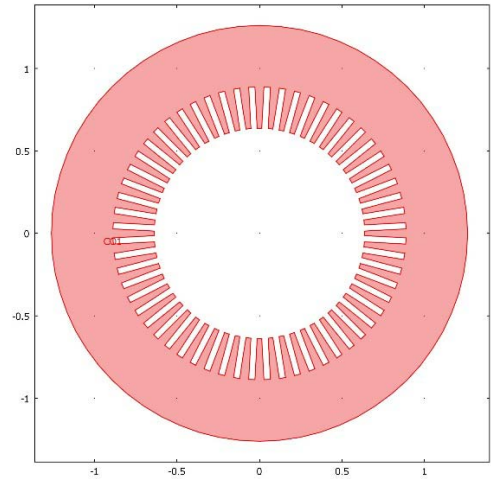


Рис. 1

$$\vec{H} = \vec{e}_z H_z(t, x, y, z) = \vec{e}_z H_z(t, x, y) e^{-z/\Delta} \quad (5)$$

Припускаючи, що у часі всі вектори поля змінюються за гармонійним законом, в декартових координатах для комплексних амплітуд рівняння (4) матиме вигляд

$$\frac{\partial^2 \dot{H}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{H}_z}{\partial y^2} - \dot{H}_z \omega \mu \gamma (i - 1/2) = \text{rot}_z \dot{J}_{\text{стор}}(x, y). \quad (6)$$

Права частина рівняння (6) у декартових координатах визначається таким чином:

$$\text{rot}_z \dot{J}_{\text{стор}}(x, y) = -\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 \dot{B}_{\text{стор } z}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{B}_{\text{стор } z}}{\partial y^2} \right). \quad (7)$$

Складові густин струмів на поверхні листа визначаються за виразами

$$\dot{J}_{\text{стор } x} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 \dot{B}_{\text{стор } z}}{\partial x^2} \right); \quad \dot{J}_{\text{стор } y} = -\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 \dot{B}_{\text{стор } z}}{\partial y^2} \right). \quad (8)$$

Граничними умовами на зовнішній границі розрахункової області є однорідні граничні умови першого роду:

$$\dot{H}_z \Big|_G = 0. \quad (9)$$

Щільність віброзбуджуючих сил пропорційна тензору магнітного натягу, який має фізичну розмірність тиску (Н/м²). Наведемо модулі нормальної та тангенціальної складових тензора магнітного натягу:

$$T_n = \left| \frac{1}{2\mu} \left(\dot{B}_n^2 - \dot{B}_\tau^2 \right) \right|, \quad (10)$$

де \dot{B}_n, \dot{B}_τ – відповідно нормальна (спрямована вздовж вектора нормалі до поверхні в заданій точці) і тангенціальна (спрямована вздовж дотичної до поверхні в заданій точці) проекції вектора магнітної індукції. Виразимо нормальну і тангенціальну складові магнітної індукції через проекції вектора індукції в декартовій системі координат за виразами

$$\begin{cases} \dot{B}_n = \dot{B}_y \cos \alpha + \dot{B}_x \sin \alpha = \left(y \dot{B}_y + x \dot{B}_x \right) / R_\delta; \\ \dot{B}_\tau = \dot{B}_x \cos \alpha - \dot{B}_y \sin \alpha = \left(y \dot{B}_x - x \dot{B}_y \right) / R_\delta, \end{cases} \quad (11)$$

де x, y – проекції радіус-вектора на осі системи координат; R_δ – радіус розточка статора.

Процес розпресування листів шихтованого магнітопроводу осердя статора описується таким чином:

$$\mu(h_0) = \frac{\mu_{\text{пл}}(h_0) \cdot h_z + \mu_0 \cdot h_0}{h_z + h_0}, \quad (12)$$

де μ – магнітна проникність шихтованого магнітопроводу; $\mu_{\text{пл}}$ – магнітна проникність i -ї пластини осердя статора; h_z – товщина пластини осердя статора; h_0 – товщина міжлистової ізоляції.

Результати моделювання. Наведемо результати математичного моделювання на прикладі конструкції серійного ТГ типу ТГВ-200-2. Чисельні розв'язки рівнянь виконувались за допомогою методу скінченних елементів у програмному середовищі COMSOL Multiphysics. Моделювання електромагнітних сил у крайньому пакеті проведено в статичному режимі для чотирьох варіантів стану пресування листів осердя статора: 1 – бездефектний

$h_0 = 0,5$ мм; 2...4 – поява розпресування листів пакета при $h_0 = 1, 1,5$ та 2 мм відповідно. На рис. 2 показано картину розподілу магнітної проникності в крайньому листі осердя статора турбогенератора в статичному режимі при $h_0 = 0,5$ мм, що відповідає бездефектному стану пакета (а), та при $h_0 = 2$ мм – відповідно розпресованому (б).

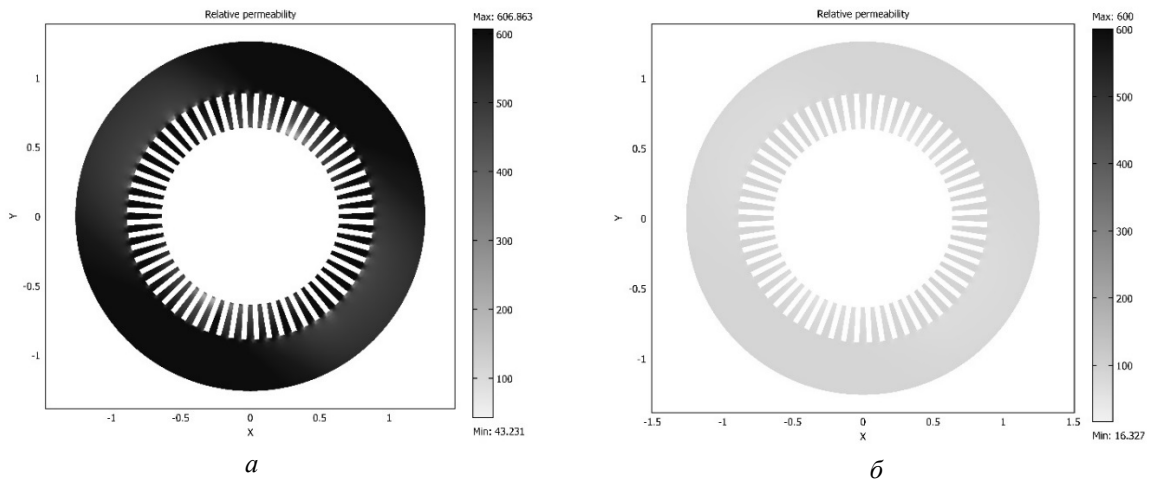


Рис. 2

Як бачимо, зі зменшенням щільності осердя статора магнітний стан погіршується і, як наслідок, при появі розвитку розпресування листів магнітна проникність зменшується у чотири рази (рис. 4, поз. 2...4).

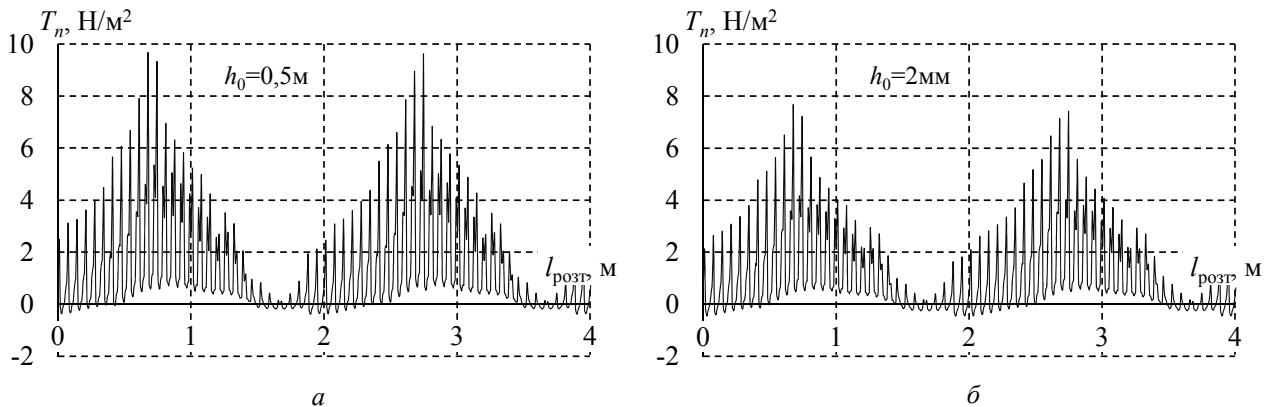


Рис. 3

На рис. 3 наведено розподіл радіальних електромагнітних сил, які діють вздовж розточки осердя статора при $h_0 = 0,5$ мм, що відповідає бездефектному стану пакета (рис. 3 а) та при розпресованому – $h_0 = 2$ мм (рис. 3 б). Таким чином, при найгіршому варіанті розпресування листів активної сталі ($h_0 = 2$ мм) магнітні сили зменшились в 1,26 разу. Так, у нормальному стані осердя статора максимальне значення тензора магнітного натягу становило $T_n = 9,67 \cdot 10^5$ Н/м², а при появі розпресування склало $T_n = 7,66 \cdot 10^5$ Н/м². Отже, амплітуда маг-

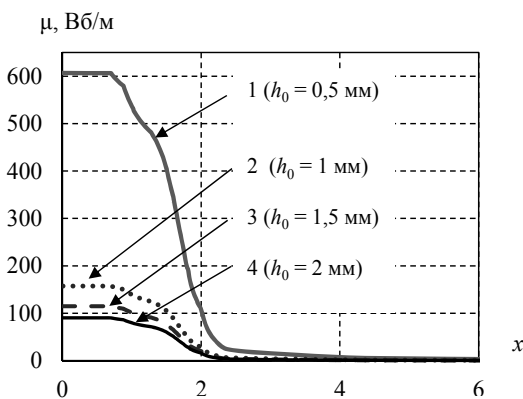


Рис. 4

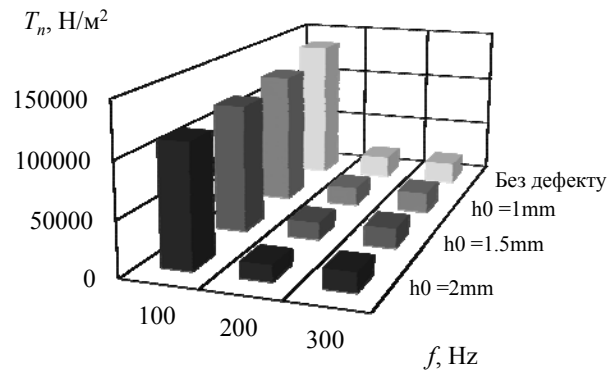


Рис. 5

нітних сил зменшилась приблизно на 20 %.

На рис. 5 показано спектрограму зміни амплітуд тензора магнітного натягу за частотами при появі розпресування листів. Аналіз цих спектрів при відстані між листами $h_0 = 2$ мм показав зменшення амплітуди магнітних сил: складової 100 Гц на 18 %, 200 Гц – на 30 % та 300 Гц – на 12 %. У результаті збільшення відстані між листами осердя статора турбогенератора спостерігається зменшення сил тензора магнітного тяжіння на поверхні розточки статора. Цей факт необхідно враховувати при визначенні вібрацій електромагнітного походження.

Висновки. Розроблено польову математичну модель для аналізу розподілу електромагнітних вібробуджуючих сил вздовж розточки статора при розпресуванні крайніх листів осердя статора турбогенератора, яка чисельно реалізована методом скінченних елементів.

На основі чисельного розрахунку електромагнітного поля осердя статора турбогенератора проведено порівняльний аналіз магнітного стану листів активної сталі статора та показано, що при появі розпресування листів радіальні магнітні сили зменшуються на 20 %. За допомогою спектрального аналізу проаналізовано зміну амплітуд тензора магнітного натягу при розпресуванні для перших трьох гармонік магнітних сил.

1. Кузьмин В.В. Электромеханические процессы в шихтованных магнитопроводах крупных электрических машин – новый подход к описанию явлений и разработке мероприятий по предотвращению появления дефектов // Гідроенергетика України. – 2010. – № 4. – С. 27–31.
2. Мельник А.М. Фізичне моделювання електромагнітних вібробуджуючих сил при розпресуванні шихтованого осердя статора турбогенератора // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2016. – Вип. 44. – С. 88–93.
3. Tavner P.J., Anderson, A.F. Core faults in large generators // Proceedings of IEEE Power Applications. – 2005. – Vol. 152, No. 6. – P. 1427–1439.
4. Qing, G.H., Qiu, J.J., Hu, Y.D. Vibration analysis of large turbo-generator stator system // International Conference on Power System Technology, October 13–17, 2002, Kunming, China. – 2002. – № 4. – P. 2168–2172.

УДК 621.313.322-81

А.Н. Мельник, асп.

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03680, Украина

Математическое моделирование радиальных электромагнитных сил при распрессовке крайних листов сердечника статора турбогенератора

Выполнено математическое моделирование электромагнитных вибровозмущающих сил при появлении распрессовки крайних листов сердечника статора мощного турбогенератора на примере серийного турбогенератора типа ТГВ-200. Показано, что при появлении ослабления листов крайнего пакета шихтованного сердечника статора турбогенератора магнитное состояние ухудшается, а максимальное значение амплитуды магнитных сил уменьшается в 1,26 раза, что необходимо учитывать при измерении вибрации. Спектральный анализ тензора магнитного натяжения при разных расстояниях между листами показал уменьшение первых трёх гармоник амплитуд основной частоты магнитных колебаний на 12...30 %. Библ. 4, рис. 5.

Ключевые слова: турбогенератор, математическое моделирование, электромагнитные силы, магнитная проницаемость, тензор магнитного натяжения.

A.M. Melnyk

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

A mathematical simulation of radial electromagnetic forces by occurrence the pressing out of end sheet of the stator core of a powerful turbogenerator

A mathematical simulation of electromagnetic vibration disturbing forces by a pressing out of end sheet of the stator core of a powerful turbogenerator as an example of serial turbo-generator type TGV-200. It is shown that the magnetic state occurrence of weakening of end package sheet of the stator core of turbogenerator is deteriorating and maximum value of the range of the magnetic force is reduced to 1,26 times. This should be consider revising by measuring vibration. Spectral analysis shown a decrease in the range of the first three harmonics of the basic frequency of the magnetic oscillation in the 12...30%. References 4, figures 5.

Key words: turbogenerator, mathematical simulation, electromagnetic forces, permeability, Maxwell stress tensor.

Надійшла 16.09.2016

Received 16.09.2016