

вул. Кржижанівського, 3, Київ-142, 030680, Україна
 6 – Державне підприємство «Харківське агрегатне конструкторське бюро»,
 вул. Сумська, 132, Харків, 61023, Україна

Дослідження електричної машини дискового типу з постійними магнітами циліндричної форми в режимі генератора

Розглянуто дискову конструкцію електричної машини з постійними магнітами циліндричної форми. Побудовано комп'ютерну модель такої електричної машини та порівняно з експериментальним зразком. Показано, що для суттєвого зменшення впливу моменту тяжіння на енергетичні показники електричної машини необхідно виконати відносне зміщення по колу протилежних частин статора, при цьому погіршення характеристик машини буде несуттєвим. Бібл. 4, рис. 9.

Ключові слова: постійні магніти, електрогенератор, магнітне поле, експериментальні дослідження, зовнішня характеристика.

V.V. Grebenikov¹, R.R. Gamaleya², M.V. Priymak³, V.S. Popkov⁴, M.V. Bogaenko⁵, Yu.V. Sharaban⁶

1, 3 – Institut of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
 Peremohy, 56, Kyiv-57, 030680, Ukraine

2 – private entrepreneur,
 Rusanivska naberezhna, 18/1, ap. 50, 02154, Kyiv, Ukraine

4, 5 – Frantsevich Institute for Problems of Materials Science NAS Ukraine,

Krzhizhanovskogo, 3, Kyiv-142, 030680, Ukraine

6 – State enterprise "Kharkov aggregate desine bureau",
 Sumska, 132, Kharkiv, 61023, Ukraine

Research of generator mode of disk type electrical engine with cylindrical permanent magnets

The paper considers the design of disk-type electrical machine with cylindrical shaped permanent magnets. Developed a computer model of such electrical machine and results of the calculation are compared to experimental data. It is shown, that for significantly reducing the influence cogging torque on the energy parameters of the electrical machine is necessary to perform relative tangential displacement the opposite stator parts while the machine performance degradation will be negligible. References 4, figures 9.

Key words: permanent magnets, electrical generator, magnetic field, experimental research, external characteristic.

Надійшла 14.05.2015

Received 14.05.2015

УДК 621.314.223

ВПЛИВ ГЕОМАГНІТНИХ ІНДУКЦІЙНИХ СТРУМІВ НА НАСИЧЕННЯ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ АВТОТРАНСФОРМАТОРА

В.В. Кирик, докт. техн. наук, **Р.В. Нагорний**, асп.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
 пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

E-mail: vkuryk@ukr.net, romannagornyua@gmail.com

Досліджено вплив геомагнітних індукційних струмів на насичення магнітної системи автотрансформатора магістральних електричних мереж 750 кВ. Отримано картину розподілу магнітної індукції в усіх стержнях автотрансформатора потужністю 333 МВА при дії геомагнітних струмів залежно від напрямків їх протікання в спільній обмотці. Встановлено можливість виникнення значного, порядку номінального, додаткового підмагнічування магнітопроводу в періоди протікання геомагнітних струмів. Бібл. 4, рис. 8.

Ключові слова: силовий автотрансформатор, насичення, магістральні електричні мережі, геомагнітні індукційні струми.

При збуренні магнітного поля Землі як періодичними, так і випадковими спалахами на Сонці на поверхні Землі виникають наведені потенціали, які викликають протікання геомагнітних індукційних струмів (ГІС) в усіх електропровідних протяжних елементах, що мають контакт з землею по всій своїй довжині, у випадку підземних трубопроводів [4] і в крайніх двох точках об'єкта у випадку високовольтних ліній електропередачі [3]. У роботі [1] автором встановлено, що значення струмів ГІС в ЛЕП можуть сягати 100...200 А. Протікання струмів такого порядку спричиняє підвищення споживання реактивної потужності трансформаторами, пониження рівнів напруги в мережі, перегрівання конструктивних елементів трансформаторного обладнання.

Мета роботи – проведення аналізу впливу на магнітну систему силових автотрансформаторів напругою 750 кВ квазіпостійних геомагнітних індукційних струмів, які мають комбіновані напрями протікання в спільних обмотках.

У попередніх дослідженнях авторами було встановлено картину розподілу ГІС у магістральних лініях 750 кВ України та визначено потенційно вразливі до дії ГІС підстанції [2]. Залежно від географічного місця розташування підстанції, конфігурації електричної мережі 750 кВ, напрямку і величини вектора геоелектричного поля струми в обмотках автотрансформаторів (АТ) можуть розподілятися по одному з чотирьох можливих варіантів, як показано на рис. 1.

Номінальна напруга, прикладена до первинної обмотки автотрансформатора, викликає протікання струму неробочого ходу \dot{I}_0 , який забезпечує намагнічування магнітної системи. Відпо-

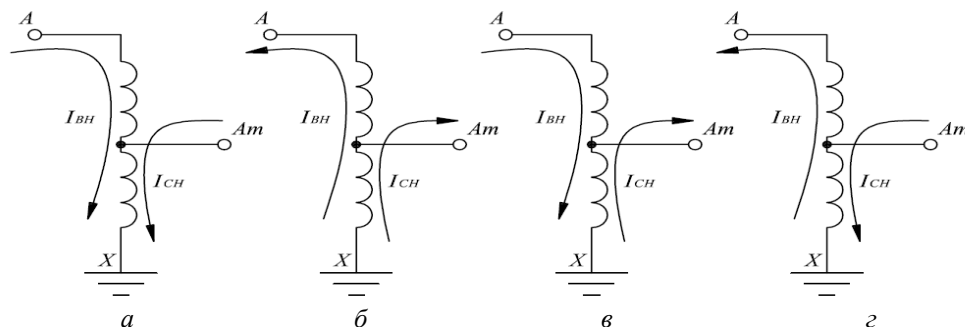


Рис. 1

відно до закону електромагнітної індукції створений магнітний потік викликає електрорушійну силу самоіндукції як у вторинній, так і в первинній обмотках:

$$e_1 = -\omega_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -\omega_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

де ω_1 та ω_2 – кількість витків обмоток високої напруги (ВН) та середньої напруги (СН) автотрансформатора відповідно; Φ – потік, що пронизує обидві обмотки.

При замиканні вторинної обмотки на навантаження по ній протікатиме струм \dot{I}_2 , напрямком якого визначається потоком, який згідно з законом електромагнітної індукції прагне компенсувати зміну основного потоку, наслідком чого згідно з тим же законом індукції струм у первинній обмотці також почне збільшуватися, тобто в будь-який момент часу виконуватиметься рівність

$$\dot{I}_0 \cdot \omega_1 = \dot{I}_1 \cdot \omega_1 + \dot{I}_2 \cdot \omega_2 \quad (2)$$

З виразу (2) видно, що результуючий магнітний потік в автотрансформаторі не змінюється і створюється лише складовою $\dot{I}_0 \cdot \omega_1$.

Квазіпостійний геомагнітний струм, протікаючи по обмотках АТ, створює власну магніторушійну силу, що призводить до появи додаткової магнітної індукції в магнітопроводі та півциклічного насичення магнітної системи.

У випадку заземлених нейтралей, що відповідає режиму нейтралі мереж 750 кВ, струми нульової послідовності можуть вільно стікати в землю. Як наслідок, потік, що пронизує обмотки ВН та СН, а також ЕРС самоіндукції підтримуються завжди синусоїдальними. Забезпечення синусоїдальності за умови глибокого насичення магнітопроводу можливе лише за рахунок генерації гармонічних складових при значному підвищенні струму намагнічування. Як результат, насичений магнітопровід генерує гармонічні складові струму, кратні трьом, які разом зі струмом ГІС утворюють систему струмів нульової послідовності.

Тому важливим моментом для встановлення впливу квазіпостійних струмів на групи однофазних автотрансформаторів напругою 750 кВ є оцінка розподілу індукції в магнітній системі автотрансформатора. Схематичне розміщення та з'єднання обмоток досліджуваного автотрансформатора потужністю 333 МВА показано на рис. 2. Прийняті напрями протікання струмів в обмотках відповідають випадку, представленою на рис. 1 в.

На рис. 2 прийнято такі позначення: S_{1-6} – поперечні перерізи віток; Φ_{1-6} – магнітні потоки у вітках; I_{CO1-2} , I_{CO} – струми в спільній обмотці (СО); $I_{ПО1-4}$, $I_{ПО}$ – струми в послідовній обмотці (ПО); $I_{РО}$ – струм у регульовальній обмотці (РО); $I_{НН1-2}$, $I_{КО}$, $I_{НН}$ – струми в обмотці низької напруги (НН); I_N – струм у нейтралі.

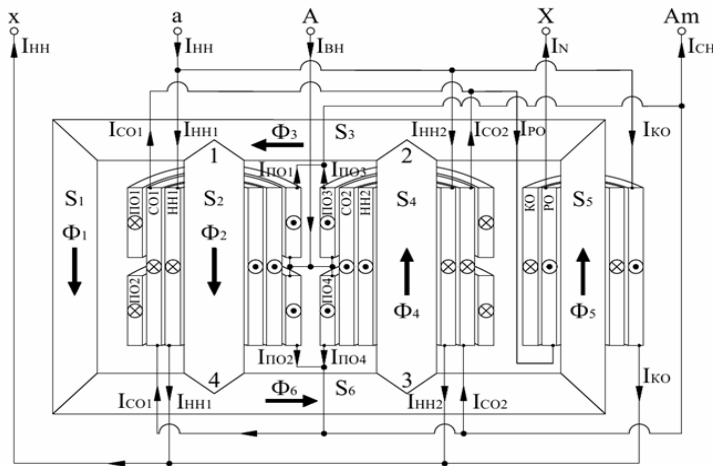


Рис. 2

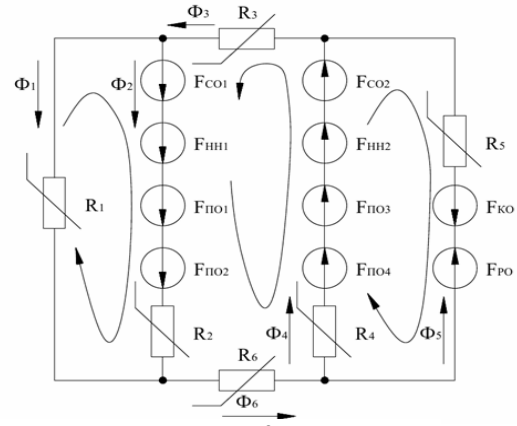


Рис.3

Слід також розрізняти як точки початку намотки обмоток, так і напрямки намотки – лівостороння чи правостороння. Напрямки струму щодо нормалі площини зображення показані у вигляді круга з точкою (напрямок до спостерігача) та перехрестям (напрямок від спостерігача) у середині. Відповідно до приведеної на рис. 2 магнітної системи та правила «гвинта» отримуємо схему заміщення, показану на рис. 3.

Згідно з першим та другим законами Кірхгофа для магнітного кола маємо

$$\begin{cases} \sum \Phi = 0, \\ \sum R_M \cdot \Phi = \sum I \cdot W. \end{cases} \quad (3)$$

Перше рівняння системи (3) складається для кожного $(N - 1)$ вузла магнітної системи з N можливих. Друге рівняння відповідає контурним рівнянням, складеним при обході $(M - N + 1)$ контурів, де M – кількість віток магнітної системи.

Згідно з рис. 3 та системою рівнянь (3) отримуємо

$$\begin{cases} \Phi_3 - \Phi_1 - \Phi_2 = 0, \\ \Phi_4 + \Phi_5 - \Phi_3 = 0, \\ \Phi_6 - \Phi_4 - \Phi_5 = 0, \\ \Phi_2 \cdot R_{M2} - \Phi_1 \cdot R_{M1} = I_{CO1} \cdot W_{CO1} + I_{INN1} \cdot W_{INN1} + I_{PO1} \cdot W_{PO1} + I_{PO2} \cdot W_{PO2}, \\ \Phi_2 \cdot R_{M2} + \Phi_4 \cdot R_{M4} = I_{CO1} \cdot W_{CO1} + I_{INN1} \cdot W_{INN1} + I_{PO1} \cdot W_{PO1} + I_{PO2} \cdot W_{PO2} + I_{CO2} \cdot W_{CO2} + I_{INN2} \cdot W_{INN2} + \\ + I_{PO3} \cdot W_{PO3} + I_{PO4} \cdot W_{PO4}, \\ \Phi_4 \cdot R_{M4} - \Phi_5 \cdot R_{M5} = I_{CO2} \cdot W_{CO2} + I_{INN2} \cdot W_{INN2} + I_{PO3} \cdot W_{PO3} + I_{PO4} \cdot W_{PO4} + I_{KO} \cdot W_{KO} - I_{PO} \cdot W_{PO}, \end{cases} \quad (4)$$

де $I_{PO1} = I_{PO2} = I_{PO3} = I_{PO4} = I_{BH} / 4$; $I_{CO1} = I_{CO2} = I_N / 2 = (I_{BH} - I_{CH}) / 2$; $I_{INN1} = I_{INN2} = I_{KO} = 0$; $W_{CO1} = W_{CO2} = 653$ витка; $W_{PO1} = W_{PO2} = W_{PO3} = W_{PO4} = 831$ виток; $W_{INN1} = W_{INN2} = 54$ витка; $W_{PO} = 54$ витка; R_M – магнітний опір, який залежить від середньої довжини магнітної лінії L_{cp} , площі поперечного перерізу магнітопроводу S та абсолютної магнітної проникності μ_a і визначається з виразу

$$R_M = \frac{L_{cp}}{\mu_a \cdot S}, \quad (5)$$

$$\mu_a = \mu \cdot \mu_0, \quad (6)$$

де μ – відносна безрозмірна величина магнітної проникності матеріалу магнітопроводу; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнітна стала.

Магнітний потік у магнітопроводі за умови рівномірного розподілу магнітної індукції, що має місце при протіканні квазіпостійного струму ГІС, розраховуємо за формулою

$$\Phi = \oint B \cdot dS = \mu_a \cdot H \cdot S = \mu \cdot \mu_0 \cdot H \cdot S, \quad (7)$$

$$B = \mu_a \cdot H = \mu \cdot \mu_0 \cdot H. \quad (8)$$

Згідно з виразами (5) та (7) добуток виду $\Phi \cdot R_M$ у лівій частині рівнянь системи (4) набуває вигляду

$$\Phi \cdot R_M = \mu_a \cdot H \cdot S \frac{L_{cp}}{\mu_a \cdot S} = H \cdot L_{cp}. \tag{9}$$

З урахуванням виразів (7), (9) і при заміні виразів у правій частині 4-, 5- та 6-го рівнянь системи (4) на сталі C_1 , C_2 та C_3 систему рівнянь (4) можна записати у такому вигляді:

$$\begin{cases} \mu_{a3} \cdot H_3 \cdot S_3 - \mu_{a1} \cdot H_1 \cdot S_1 - \mu_{a2} \cdot H_2 \cdot S_2 = 0, \\ \mu_{a4} \cdot H_4 \cdot S_4 + \mu_{a5} \cdot H_5 \cdot S_5 - \mu_{a3} \cdot H_3 \cdot S_3 = 0, \\ \mu_{a6} \cdot H_6 \cdot S_6 - \mu_{a4} \cdot H_4 \cdot S_4 - \mu_{a5} \cdot H_5 \cdot S_5 = 0, \\ H_2 \cdot L_{cp2} - H_1 \cdot L_{cp1} = C_1, \\ H_2 \cdot L_{cp2} + H_4 \cdot L_{cp4} = C_2, \\ H_4 \cdot L_{cp4} - H_5 \cdot L_{cp5} = C_3. \end{cases} \tag{10}$$

Система (10) має шість невідомих і складається з шести рівнянь, що не створює труднощів знаходження напруженості магнітного поля в кожній вітці магнітопроводу:

$$[A] \cdot [H] = [C] \Rightarrow [H] = [A]^{-1} \cdot [C], \tag{11}$$

де $[A]$ – матриця коефіцієнтів при змінних H ; $[C]$ – матриця вільних членів.

Для врахування нелінійності кривої намагнічування, а отже нелінійної зміни відносної проникності сталі магнітопроводу μ , як наслідок, абсолютної магнітної проникності необхідно виконувати ітераційне уточнення значення абсолютної магнітної проникності сталі (марки 3807) згідно з алгоритмом, представленим на рис. 4.



Рис. 4

На основі наведених викладень у програмному середовищі *Matlab* була розроблена програма, яка дала змогу розрахувати індукцію магнітного поля для кожного значення стру-

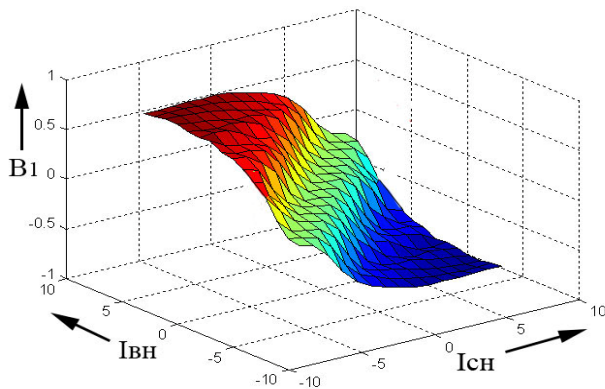


Рис. 5

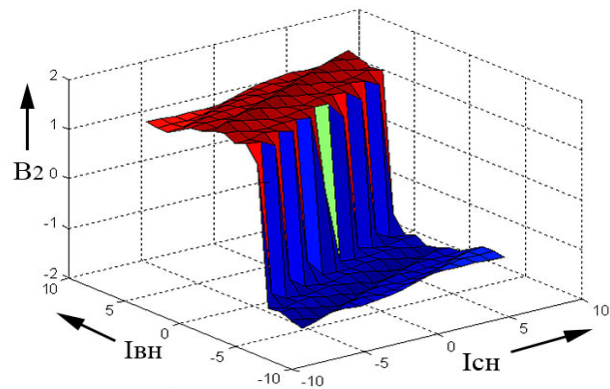


Рис. 6

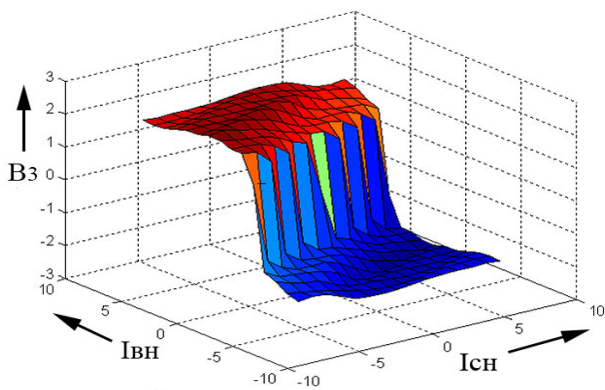


Рис. 7

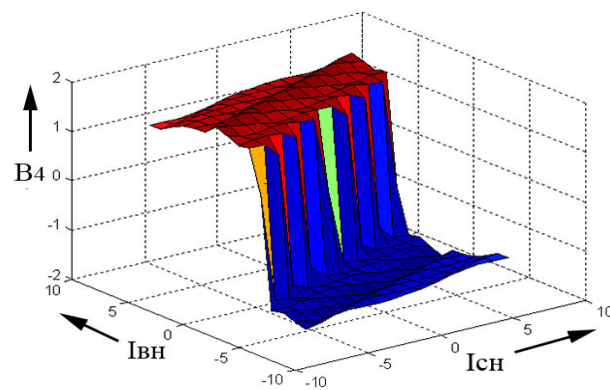


Рис. 8

му I_{BH} , що змінювався в діапазоні від -7 до 7 А з кроком 0,5 А. Причому для кожного значення I_{BH} струм I_{CH} змінювався також у діапазоні від -7 до 7 А з тим же кроком. Значення струмів I_{BH} та I_{CH} взяті з міркування сходження ітераційного процесу, оскільки глибоке насичення спостерігається вже в зазначених діапазонах.

У результаті дослідження були отримані тривимірні діаграми для окремих віток магнітної системи (рис. 5–8), де по осях Ох та Оу представлені струми I_{BH} та I_{CH} , а по осі Oz – максимальне значення магнітної індукції для заданої комбінації струмів. Діаграми для 5- та 6-ї віток схожі до діаграм відповідно 1- (рис. 5) та 3-ї (рис. 7) віток, і тому в рамках статті не наведені. Аналіз діаграм для 3- (рис. 6) та 6-ї віток свідчить, що має місце швидке насичення магнітопроводу вище номінального (2,05 Тл) при струмі $I_{BH} = 7$ А ($I_{CH} = 0$ А).

Що стосується бокових ярем (1- та 5-та вітки), то хоча вони певною мірою "розвантажують" основні стержні, проте індукція в них при будь-яких значеннях струму ГІС залишається нижче зони насичення, що викликано значною протяжністю цих віток у порівнянні з головним контуром, утвореним 2-, 3-, 4- та 6-ю вітками.

Не спостерігається також взаємокомпенсація струмів ГІС для випадків рис. 1 в та з, коли струм ГІС у спільній обмотці автотрансформатора є результатом різнонаправленого протікання в обмотках ВН та СН, оскільки магніторушійна сила послідовної обмотки не компенсується, а насичення основних стержнів спостерігається при незначних ГІС. Тобто спільна обмотка в цьому випадку особливого вкладу в розподіл магнітної індукції не вносить.

Для мінімізації впливу ГІС на насичення магнітної системи автотрансформатора доцільно подавати розмагнічуючий постійний струм на обмотки НН₁, НН₂ та КО пропорційно ГІС таким чином, щоб викликані ним магніторушійні сили частково або за можливості повністю компенсували магніторушійні сили, викликані ГІС.

1. Кирик В.В. Геомагнитные причины нарушений режимов работы высоковольтных сетей в энергосистемах // Энергетика та електрифікація. – 2014. – №4. – С. 38–44.
2. Кирик В.В., Нагорний Р.В. Дослідження розподілу геомагнітних індукційних струмів у магістральних електричних мережах 750 кВ // Энергетика: економіка, технології, екологія: Науковий журнал. – 2014. – № 2(36). – С. 101–105.
3. Кириленко А.В., Кирик В.В., Подольцев А.Д. Геомагнитные индукционные токи в электрических сетях // Энергетика та електрифікація. – 2012. – №11. – С. 46–49.
4. Boteler D.H. Geomagnetic effects on the pipe-to-soil potentials of a continental pipeline // Advances in Space Research - ADV SPACE RES, 26. – 2000. – С. 15–20.

УДК 621.314.223

В.В. Кирик, докт. техн. наук, **Р.В. Нагорний**, асп.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

Влияние геомагнитных индукционных токов на насыщение магнитной системы автотрансформатора

Исследовано влияние геомагнитных индукционных токов на насыщение магнитной системы автотрансформатора магистральных электрических сетей 750 кВ. Получена картина распределения магнитной индукции во всех стержнях автотрансформатора мощностью 333 МВА при действии геомагнитных токов в зависимости от направления протекания в общей обмотке. Установлена возможность значительного, порядка номинального, дополнительного подмагничивания магнітопровода в периоды протекания геомагнитных токов. Библ. 4, рис. 8.

Ключевые слова: силовой автотрансформатор, насыщение, магистральные электрические сети, геомагнитные индукционные токи.

V.V. Kyryk, **R.V. Nagorny**

National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute», Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

Influence of geomagnetically induced currents on autotransformer magnetic system saturation

This paper investigates the influence of geomagnetically induced currents on 750 kV autotransformer magnetic system saturation. Depending on the directions of geomagnetically induced currents in autotransformer common winding, the pictures of magnetic induction distributions for each autotransformer branches were obtained. It was established that additional order of the rated magnetic core magnetization can appear. References 4, figures 8.

Key words: power autotransformer, saturation, transmission grids, geomagnetically induced currents.

Надійшла 15.05.2015

Received 15.05.2015