

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМУ НЕРОБОЧОГО ХОДУ ПОТУЖНОГО П'ЯТИСТРИЖНЕВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Сергій Зірка

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7607-1436>

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

Денніс Алберт

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8916-851X>

OMICRON electronics GmbH, Клаус, Австрія

Вступ

Силові трансформатори великої потужності відносяться до найбільш відповідальних і вартісних елементів електричних мереж. Тривала робота трансформаторів без відключень вимагає врахування втрат енергії в цих апаратах і висуває високі вимоги до достовірності їх моделювання. Метою цієї статті є вдосконалення динамічної моделі п'ятистріжневого трифазного трансформатора, що застосовується для зменшення габаритної висоти апарату. Модель, що розглядається, розвиває моделі та методи, що описані в [1], [2] та [3]. Запропоновані вдосконалення полягають в більш детальному відтворенні роботи трансформатора в режимі неробочого ходу при номінальній та підвищеній напрузі живлення.

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження даної роботи є моделювання підвищувального генераторного трансформатора потужністю 786 МВА і схемою обмоток $Yd11$. Внутрішня обмотка низької напруги (НН) з'єднана в трикутник (d) з лінійною напругою 28 кВ, а лінійна напруга з'єднаної в зірку (Y) зовнішньої обмотки високої напруги (ВН) – 525 кВ. Решту параметрів трансформатора наведено в [4].

Проміжним завданням дослідження є модельне відтворення втрат неробочого ходу трансформатора в широкому діапазоні НН. Другий і основний етап роботи полягає у відтворенні на моделі форми струмів у трифазній лінії, що живить обмотку НН (модель має охоплювати НН, що досягають 110% від номіналу). Слід зауважити, що задача розрахунку форми струмів ставилась в [5], однак типових кривих струму в тій роботі виявлено не було, а її автори обмежились моделюванням трансформатора за номінальної напруги.

ТОПОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ П'ЯТИСТРИЖНЕВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

В основу дослідження було покладено модель п'ятистрижневого трансформатора, показано на рисунку 1.

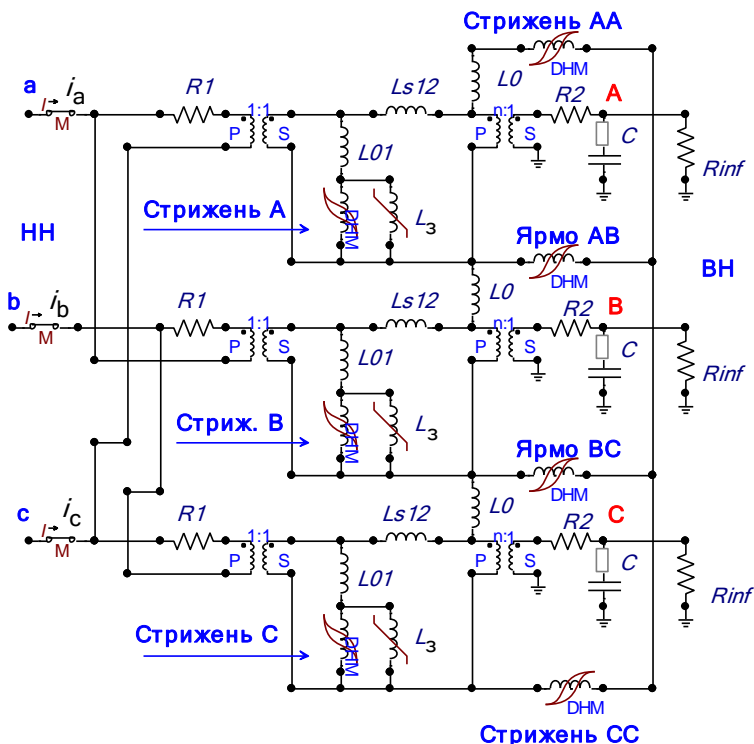


Рисунок 1 – Електрична модель п'ятистрижневого трансформатора

Детальний опис елементів моделі наведений в [1], [2] та [3], де зміни індуктивності L_3 характеризують немагнітні зазори між стрижнями і ярами осердя. Топологічний характер моделі зумовлений роздільним представленням стрижнів і ярем. Ці елементи показані на рисунку 1 гістерезисними індукторами DHM (Dynamic Hysteresis Model) [6].

Використання моделей на основі швидкодіючої DHM стало особливо доцільним після включення DHM до загальнодоступної програми розрахунку перехідних процесів ATP/ATPDraw [7], де цей елемент має назву $L(i)$ Zirka-Moroz nonlinear inductor.

МОДЕЛЮВАННЯ ВТРАТ НЕРОБОЧОГО ХОДУ

При виконанні даного дослідження інформація про сталь осердя і схему його шихтування була відсутня. В такій ситуації електротехнічну сталь 27ZDKH85 корпорації Nippon Steel було обрано в бібліотеці ДНМ в якості матеріалу осердя трансформатора.

Суцільними лініями на рисунку 2(а) показані залежності питомої енергії W (в Дж/м³ за цикл) від пікової індукції B_m , що розраховані з використанням ДНМ для сталі 27ZDKH85 на частотах 50 та 60 Гц. Як можна побачити, розраховані втрати W є близькими до ізолюваних точок на рисунку 2(а), які є значеннями втрат, перерахованих з каталогу Nippon Steel [8], де вони наведені у W_{atax} на кілограм.

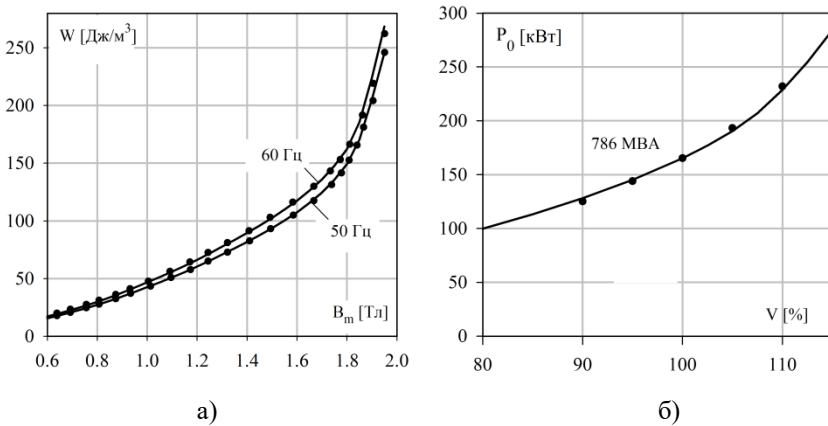


Рисунок 2 – а) Питомі втрати енергії в сталі 27ZDKH86; б) Втрати неробочого ходу трансформатора 786 МВА

Втрати неробочого ходу P_0 , виміряні для трансформатора, що розглядається, позначені ізолюваними точками на рисунку 2(б). Розрахована крива втрат, що проходить через ці точки, ілюструє точність моделі щодо розрахунку втрат неробочого (холостого) ходу.

МОДЕЛЮВАННЯ ЛІНІЙНИХ СТРУМІВ НЕРОБОЧОГО ХОДУ

Моделлю *першого* наближення називаємо схему на рисунку 1, в якій відсутні ємності C та індуктивності L_s . За такого спрощення моделі її лінійні струми i_a , i_b , i_c , показані пунктирними кривими на рисунку 3, значно відрізняються від вимірних струмів, представлених на рисунку 3 суцільними кольоровими кривими.

Моделлю *другого* наближення називаємо схему на рисунку 1, де

індуктивності L_3 , як і раніше, відсутні, а ємності C враховують власні ємності обмоток і введів ВН. Оскільки значення C є єдиним невідомим параметром моделі, то це значення легко знаходиться методом спроб і помилок. Криві струмів, показані пунктиром на рисунку 4, були розраховані для значень C , що дорівнюють 1900 пФ.

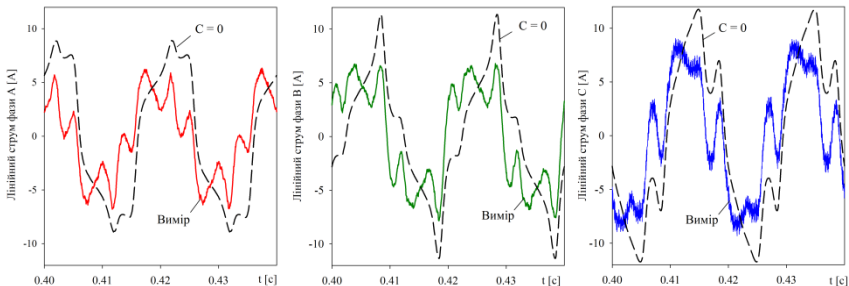


Рисунок 3 – Криві струмів, розраховані без урахування ємностей

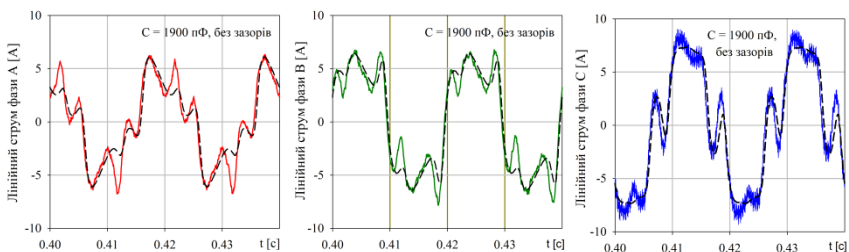


Рисунок 4 – Криві струмів, розраховані з урахування ємностей

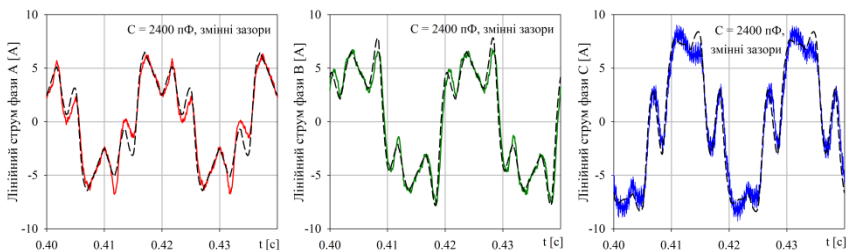


Рисунок 5 – Криві струмів, розраховані з урахування ємностей і зазорів в осерді

Хоча результати розрахунків на рисунку 4 вже непогано збігаються з результатами вимірів, на цьому етапі постало питання про можливість подальшого поліпшення результатів моделювання. Такі поліпшені результати показані на рисунку 5, де розраховані криві

струмів більш точно відтворюють піки експериментальних струмів.

Можливість поліпшення результатів надає побудова гістерезисних кривих моделі, наприклад кривої $\psi_a - i_a$ на рисунку 6(а) і її порівняння з відповідною експериментальною кривою. (Значення ψ_a знаходяться тут шляхом інтегрування відповідних фазних напруг).

Як видно з рисунку 6(а), нахил вимірної петлі в діапазоні поточкозчеплень від -20 до $+20$ В·с відтворюється точніше, якщо ємність C збільшити від 1900 пФ до 2400 пФ. Водночас петля, розрахована при 2400 пФ, значно відхиляється від вимірної кривої для потокозчеплень ψ , що перевищують за модулем значення 20 В·с.

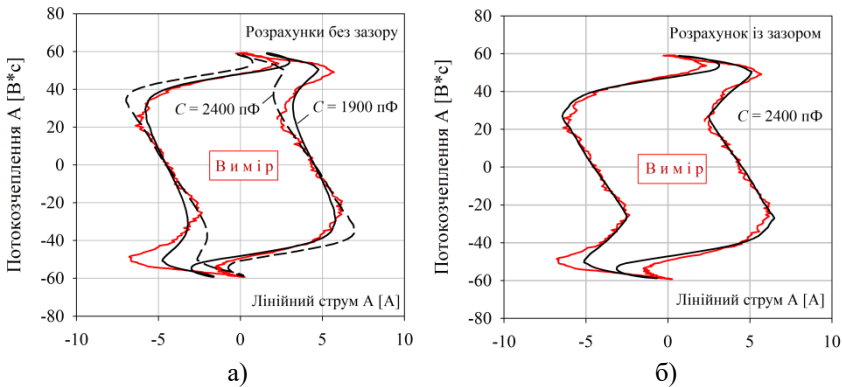


Рисунок 6 – а) Потокозчеплення фази А, розраховані без урахування зазорів в осерді; б) Те ж потокозчеплення при урахуванні зазорів

Такий хід кривої, що відповідає ємності 2400 пФ, вказує на необхідність врахування в моделі немагнітних зазорів в осерді, які, як відомо, повертають петлю за годинниковою стрілкою. Оскільки такий поворот має відбуватися лише при $|\psi| > 20$ В·с, модельні зазори мають бути малими при $|\psi| < 20$ В·с, а потім швидко зростати. Пояснення такої поведінки зазору наведено в [3] та [9]. В роботі [3] було також запропоновано спосіб реалізації концепції змінного зазору в електричній заступній схемі. Згідно до цього способу, в модель на рисунку 1 були введені змінні індуктивності L_z зазорів, вебер-амперна характеристика (ВАХ) яких показана у двох масштабах на рисунку 7(а). Щоб порівняти отримані результати з тими, що наведені в [3] та [9], на рисунку 7(б) показано залежність величини зазору Δ від максимальної індукції B_m у стрижні (індукція в зазорі і стрижні осердя вважається однаковою).

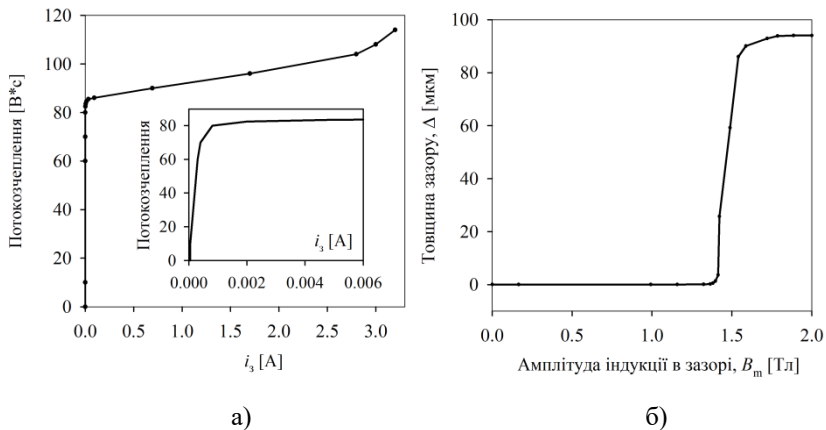


Рисунок 7 – а) ВАХ немагнітного зазору і б) залежність його товщини Δ від B_m

Форми лінійних струмів, виміряних і розрахованих при напрузі у 110% від номінальної, показані на рисунку 8.

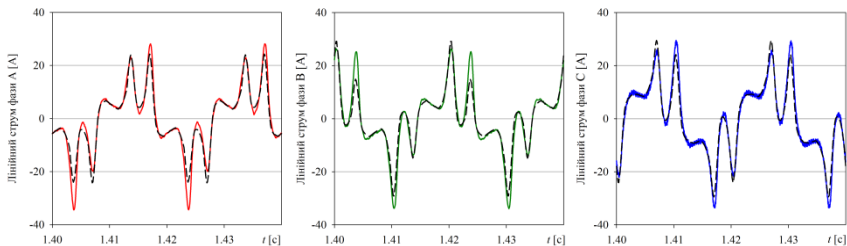


Рисунок 8 – Криві струмів, виміряних (суцільні криві) і розрахованих (пунктиром) при $V = 110\%$ з урахування ємностей і зазорів в осерді

Невелика відмінність кривих на *рисунку 8* обумовлена асиметрією виміряних струмів, тобто похибками у вимірюванні.

ВИСНОВКИ

Показана можливість відтворювання втрат енергії і лінійних струмів неробочого ходу в трифазному трансформаторі з п'ятьма стрижнями з використанням топологічної моделі із зосередженими параметрами. Точність моделі досягнуто завдяки врахуванню гістерезисних властивостей осердя, еквівалентних ємностей фаз і немагнітних зазорів між стрижнями і ярмами магнітопроводу. Можливості моделі проілюстровані моделюванням потужного трансформатора.

ПОСИЛАННЯ

1. Зирка, С. Е., Мороз, Ю. И., Мороз, Е. Ю., Тарчуткин А. Л. (2011). Моделирование переходных процессов в трехфазном трансформаторе с учетом топологии и гистерезисных свойств магнитопровода. *Технічна електродинаміка*, 5, 25–35.
2. Zirka, S. E., Moroz, Y. I., Elovaara, J., Lahtinen, M., Walling, R. A., Høidalen, H. K., Bonmann, D., Arturi, C. M., Chiesa, N. (2018). Simplified models of three-phase, five-limb transformer for studying GIC effects. *Electrical Power and Energy Systems*, 103, 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.05.035>
3. Zirka, S. E., Albert, D., Moroz, Y. I., Renner, H. (2022). Further improvements in topological transformer model covering core saturation. *IEEE Access*, 10, 64018 – 64027. 10.1109/ACCESS.2022.3183279
4. Albert, D. (2022). *Analysis of Power Transformers under DC/GIC Bias*, PhD Thesis, Institute of Electrical Power Systems, Graz University of Technology, Graz, Austria.
5. Carrander, C., Mousavi, S. A., & Engdahl, G. (2017). An application of the time-step topological model for three-phase transformer no-load current calculation considering hysteresis. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 423, 241–244. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.09.088>
6. Zirka, S. E., Moroz, Y. I., Chiesa, N., Harrison, R. G. & Høidalen, H. K. (2015). Implementation of inverse hysteresis model into EMTP – Part II: Dynamic model, *IEEE Transaction on Power Delivery*, 5(30), 2233-3241. 10.1109/TPWRD.2015.2416199
7. Høidalen, H. K., Prikler, L., & Peñaloza, F. (2021). *ATPDraw Version 7.3 for Windows. Users' Manual*, NTNU, Trondheim, Norway.
8. Nippon Steel catalog. (2019). https://www.nipponsteel.com/product/catalog_download/pdf/D004je.pdf
9. Elleuch, M. & Poloujadoff, M. (1998). New transformer model including joint air gaps and lamination anisotropy, *IEEE Transaction on Magnetics*, 5(34), 3701-3711. 10.1109/20.718532