

УДК 621.313

Войткевич Р.І.¹, Тиховод С.М.²

¹ студ. гр. Е-910м НУ «Запорізька політехніка»

² д-р. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

ПОЛІПШЕННЯ ЗБІЖНОСТІ ІТЕРАЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В КОЛАХ З КОТУШКАМИ ІНДУКТИВНОСТІ З СУЧАСНОЮ СТАЛЛЮ

Різка зміна режиму роботи силового трансформатора (наприклад, включення його під номінальну напругу) призводить до перехідного процесу в його електромагнітній системі. Перехідний процес може протікати так, що магнітопровід входить в повне насичення, а кидок струму може в десятки разів перевищити номінальне значення. Тому завдання оцінки перехідних процесів при різкій зміні режиму роботи силового трансформатора або котушки з феромагнітним сердечником є актуальною. В даний час таку оцінку широко проводять за допомогою моделювання електромагнітних процесів в схемах заміщення трансформатора і електричного кола, в яку він включений. Трансформатор

розглядається як електромагнітне коло, що містить пов'язані між собою гілки різної природи. За електричним гілкам протікає електричний струм, а по магнітним гілкам - магнітний потік. Електричні струми, що протікають по обмотках, створюють відповідно до закону повного струму магніторухілих сили, і це враховується введенням в коло джерел напруги, керованих струмом ($i_{\text{нус}}$). Магнітні потоки, що протікають по гілках магнітопроводу, відповідно до закону електромагнітної індукції створюють в обмотках додаткові напруги. Це враховується введенням в коло джерел напруги, керованих похідною магнітного потоку ($\text{INU } d\Phi/dt$). Для моделювання динамічних електромагнітних процесів в таких схемах заміщення розроблена спеціалізована програма COLO. Останнім часом в трансформаторобудуванні знаходить широке застосування холоднокатана текстурована електротехнічна сталь. Ця сталь в порівнянні з гарячекатаною сталлю має більше значення магнітної проникності і більшого значення магнітної індукції насичення. При цьому залежність $B(H)$ холоднокатаної текстурованої сталі має вигляд різко змінюється функції від нуля до магнітної індукції насичення. Це призводить до появи тенденції розбіжності обчислювального процесу при моделюванні.

Поставлене завдання вирішене за допомогою програмного комплексу COLO, розробленого автором статті. Програма COLO призначена для розрахунку часових залежностей струмів, магнітних потоків, електричних і магнітних напруг в будь-яких елементах взаємопов'язаних електричних та магнітних нелінійних кіл.

Вебер-амперні характеристики нелінійних магнітопроводів задаються масивами опорних точок магнітних напруг і магнітних потоків. Тому визначення напруги по заданому струму в проміжних точках в процесі обчислень виконується з використанням сплайн - інтерполяції. Масиви опорних точок кривих намагнічування отримують експериментально, а експериментальні точки завжди мають деякий розкид. Цей розкид може бути причиною розходження ітераційного процесу, який виконується на кожному кроці інтегрування. У програмі COLO характеристики нелінійних елементів обробляються спеціальними сплайн-функціями, що викликаються з Spline Toolbox системи Matlab. У Spline Toolbox передбачена робота не з самими характеристиками, а з їх pp-формами (наборами коефіцієнтів сплайн-інтерполяції), що спрощує апроксимацію і прискорює обчислення. Отримати pp-форму в системі Matlab можна за допомогою оператора: $pp = \text{csapi}(MB, MH)$, де MB, MH - вектори опорних точок для B і H кривої намагнічування сталі. У Spline Toolbox є також можливість використання згладжування сплайна з заданим коефіцієнтом згладжування. Однак для різко змінюється функції використання згладжування сплайна призводить до неадекватного результату. Якщо згладжуваний сплайн застосувати до логарифму залежності $\ln H(B)$, то отримана апроксимація виконується адекватно і при цьому згладжується розкид експериментальних точок

кривої намагнічування. Це призводить до поліпшення стійкості числового методу, що застосовується при моделюванні електромагнітного процесу.