

МОДЕЛЮВАННЯ ФЕРОРЕЗОНАНСНОГО ПРОЦЕСУ В ТРАНСФОРМАТОРІ НАПРУГИ ПРЯМИМ МЕТОДОМ

О.Б. Бесараб¹, аспірант, **Ю.І. Тугай²**, канд. техн. наук

¹ – Нац. техн. ун-т України «Київський політехнічний інститут»,

пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна

² – Ін-т електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Розроблено математичну модель індуктивного трансформатора напруги НКФ-220. Проведено моделювання ферорезонансних процесів у середовищі АТР/ЕМТР. Показано вплив початкових умов на усталений ферорезонансний режим. Отримано області існування ферорезонансних процесів для трансформатора НКФ-220. Бібл. 7, рис. 4.

Ключові слова: ферорезонанс, моделювання, АТР/ЕМТР.

Вступ. Насичення осердя трансформатора напруги (ТН) призводить до того, що його індуктивність змінюється. Принцип проектування магнітних кіл електричних апаратів і машин полягає у забезпеченні неможливості перевищення величиною магнітного потоку рівня, характерного для насичення використовуваного матеріалу магнітопроводу. Цей критерій має бути виконаний для нормальних умов експлуатації пристрою, однак магнітопровід тимчасово може насичуватися під час перехідних процесів у мережі, наприклад, під час увімкнення під напругу. Наявність нелінійної індуктивності в поєднанні з ємністю призводить до можливості виникнення ферорезонансних явищ [7] в електричних мережах.

Незгасаючі ферорезонансні коливання в енергосистемі небезпечні для встановленого обладнання у зв'язку з великими надструмами та/або перенапругами, які, зрештою, можуть призвести до пошкодження обладнання. Причиною деяких незрозумілих аварій може бути саме це нелінійне явище.

Передумови дослідження та постановка завдання. Для перевірки можливості виникнення небезпечних ферорезонансних коливань необхідно провести аналіз відповідних нелінійних схем, який передбачає розрахунок перехідних та усталених режимів, визначення струмів та напруги в колі як функцій часу. Нелінійність ферорезонансних кіл не дає змоги використовувати загальні прийоми аналітичного розв'язання нелінійних систем диференціальних рівнянь [1], що описують процеси у ферорезонансному колі. Тому для аналізу таких кіл необхідно застосовувати методи числового інтегрування.

Метою цієї роботи було проведення чисельного моделювання ферорезонансу в обмотці ВН індуктивного ТН типу НКФ-220 та аналізу ферорезонансних коливань, що виникають у результаті взаємодії між ТН та ємностями мережі. Для досягнення поставленої мети було розроблено адекватну розрахункову модель ферорезонансного кола та виконано відповідні розрахунки.

Моделювання індуктивного ТН. Трансформатори напруги характеризуються особливою конструкцією та номінальною потужністю, як правило, дуже малими через їх метрологічне призначення. Номінальні первинні струми в ТН, як правило, порядку одиниць міліампер, а первинна напруга від одиниць до десятків (СН) або до сотень (ВН) кіловольт.

У теорії електричних машин при моделюванні нелінійних індуктивних елементів застосовують основну (комутаційну) криву намагнічування, що представляє собою геометричне місце вершин гістерезисних циклів, які отримують при циклічному перемагнічуванні [2, 5]. Вона є залежністю потокозчеплення від струму намагнічування обмотки $\Psi = f(i)$ або залежністю магнітної індукції від напруженості магнітного поля $B = f(H)$ і може виражатися як в абсолютних, так і у відносних одиницях.

До функції, яка апроксимує характеристику намагнічування, ставляться наступні вимоги:

- 1) функція повинна давати найбільш точне наближення;
- 2) оскільки функція використовується в операціях диференціювання, її похідна також має бути можливо більш точним наближенням;
- 3) похідна функції має бути безперервною на досліджуваній області визначення;
- 4) функція не повинна призводити до занадто складних розрахунків;
- 5) функція має бути непарною;
- 6) функція не повинна мати точок перегину на обох півосях.

У розрахунках часто використовують кусково-лінійну апроксимацію кривої намагнічування [2, 4, 5]. Основним недоліком такого наближення є стрибкоподібна зміна похідної при переході від однієї ділянки до іншої. Окрім цього, кусково-лінійна апроксимація не гарантує виконання 5 і 6 пунктів зазначених вимог.

Для апроксимації кривої намагнічування магнітопроводів трансформаторів бажано застосовувати аналітичні функції, що не містять складні багаточлени. Застосування тієї або іншої формули залежить від конкретних умов моделювання процесу намагнічування. Деякі формули досить точно апроксимують криву намагнічування в початковій частині, інші – на її «колінні».

Найбільш вимогам до апроксимуючих функцій задовольняє формула арктангенса з трьома коефіцієнтами і лінійним членом [4]:

$$B = \alpha \cdot \arctg(\beta H) + \gamma H. \quad (1)$$

Вона забезпечує досить точне наближення на всіх характерних ділянках кривої намагнічування, а її похідна має відносно простий математичний опис:

$$\frac{dB}{dH} = \frac{\alpha\beta}{1+(\beta H)^2} + \gamma. \quad (2)$$

Для більш ефективного комп'ютерного моделювання ТН у роботі [3] пропонується виконання апроксимації залежності потокозчеплення від струму намагнічування функцією арктангенса з лінійним членом, розбитою на два інтервали:

$$\Psi(i) = \begin{cases} \alpha_1 \cdot \arctg(\beta_1 i) + \gamma_1, & i \leq I_{\text{крит}}; \\ \alpha_2 \cdot \arctg(\beta_2 i) + \gamma_2, & i > I_{\text{крит}}. \end{cases} \quad (3)$$

Для трансформатора НКФ-220 коефіцієнти апроксимації матимуть такі значення: $\alpha_1 = 461,17$; $\beta_1 = 552,6565$; $\gamma_1 = 366,5$; $\alpha_2 = 512,4$; $\beta_2 = 71,5815$; $\gamma_2 = 109,5$; $I_{\text{крит}} = 0,16$ А. На рис. 1 представлено графік розрахункової кривої намагнічування ТН типу НКФ-220.

З метою перевірки ТН НКФ-220 на можливість виникнення ферорезонансу у середовищі АТР/ЕМТР[6] була розроблена імітаційна модель (рис. 2). Модель трансформатора напруги представлена чотирма елементами: $L(i)$ – нелінійна індуктивність ТН; R_T – активний опір ТН; X_T – реактивний опір ТН; R_{CT} – опір, що моделює активні втрати в магнітопроводі ТН; C_B – ємність дільників напруги за розривами вимикача; $C_{\text{ш}}$ – сумарна ємність відносно землі шин, роз'єд-

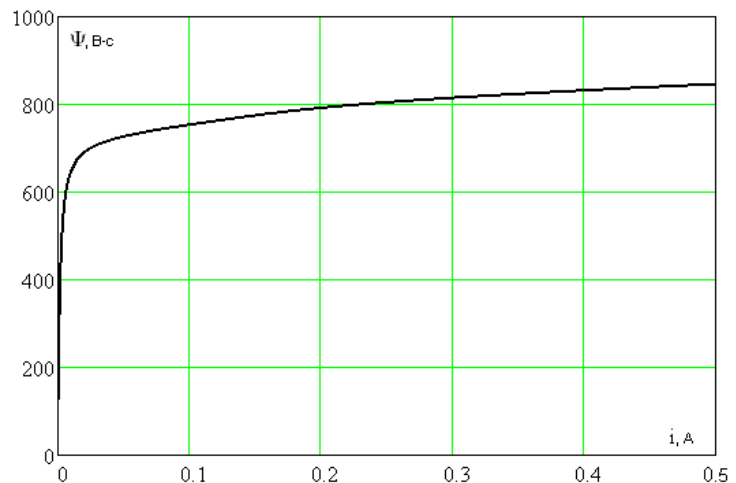


Рис. 1

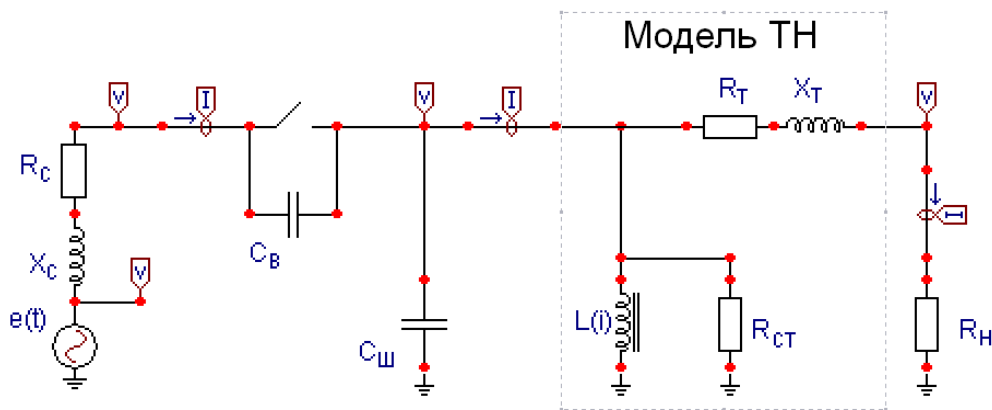


Рис. 2

нувачів, розрядників, вимикачів, ТН та іншої високовольтної апаратури, підключеної до системи шин; R_C та X_C – відповідно активний та реактивний еквівалентні опори системи; $e(t)$ – джерело ЕРС; R_H – навантаження ТН.

Моделювання ферорезонансного процесу у середовищі АТР/ЕМТР. Можливість ферорезонансу була перевірена для різних значень ємності дільників напруги вимикача C_B та ємності ошиновки $C_Ш$. Область перевірки значень ємності дільників та ошиновки включає в себе ємності найбільш поширених РП 220 кВ. Значення ємності дільників було прийнято у діапазоні від 200 до 2400 пФ із кроком 200 пФ, а значення ємності ошиновки – від 200 до 3600 пФ із кроком 200 пФ.

При моделюванні значення мережевої напруги прийнято рівним максимально допустимій робочій нарузі $U = 1,1 \cdot U_{ном} = 242$ кВ. Навантаження ТН прийнято рівним номінальному для класу точності 0,5.

Ферорезонанс є складним явищем, у якому поява конкретного режиму дуже чутлива до початкових умов. Початковий заряд конденсатора та поточозчеплення у котушці визначають, яким у результаті буде усталений режим. Порівняємо процеси у досліджуваній схемі при різних фазах комутації вимикача. Прийнемо такі значення ємностей: $C_B = 2000$ пФ; $C_Ш = 1800$ пФ. На рис. 3 представлено осцилограми струму і напруги первинної обмотки ТН при фазі комутації вимикача $\varphi = 0^\circ$ (а) та при $\varphi = 90^\circ$ (б).

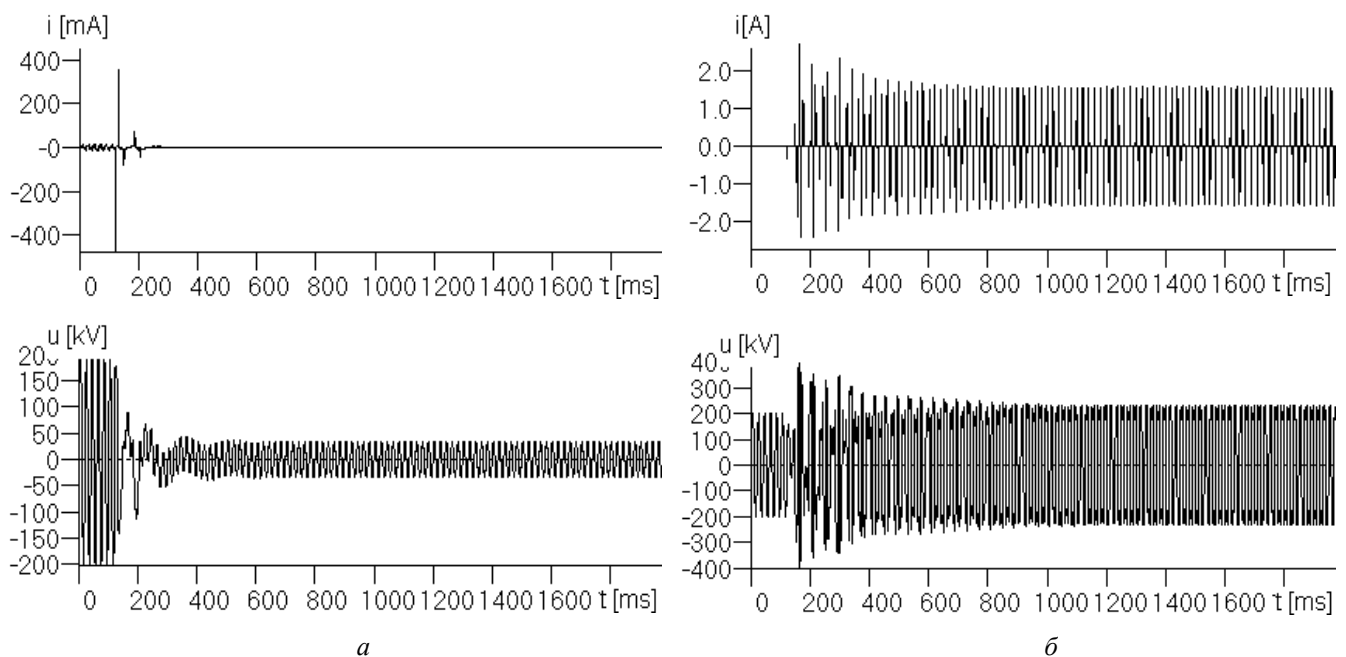


Рис. 3

Зважаючи на вплив початкових умов на результуючий усталений режим, моделювання проводили для різних фаз комутації, а саме від $\varphi = 0^\circ$ до $\varphi = 180^\circ$ із кроком 18° . Результати моделювання представлені на рис. 4.

На цьому рисунку можна виділити такі характерні області:

- область заповнена символами \circ відповідає значенням ємності ошиновки та дільників вимикача, при яких виникають стійкі ферорезонанси коливання на основній частоті зі значними надструмами, що є небезпечними для ТН;
- при ємностях мережі, які відповідають області, позначеній символами \square , виникають стійкі ферорезонансні коливання на частоті 16,67 Гц, що відрізняється від частоти коливань джерела енергії – це так званий субгармонічний ферорезонанс. Для цієї області також характерні небезпечні для ТН надструми, оскільки індуктивний опір для цієї частоти втричі менший, ніж для частоти мережі.
- незаповнена частина на рис. 4 відповідає області, у якій не виникають усталені резонансні процеси, а коливальний процес після розмикання вимикача швидко затухає.

Для розподільчих пристроїв із ТН, ємності яких відповідають першим двом областям, необхідно передбачити заходи щодо попередження ферорезонансних процесів.

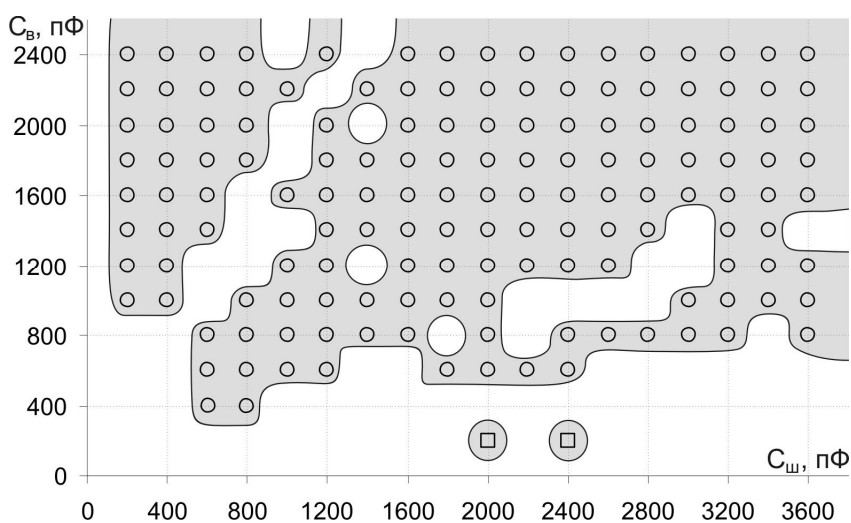


Рис. 4

Зокрема, можуть бути використані такі засоби: виключення можливості утворення ферорезонансного контура; розлагодження ферорезонансного контура, що утворений джерелом живлення, ємностями та індуктивностями; зниження добротності ферорезонансного контура включенням у нього резистора; введення в ферорезонансний

контур стороннього джерела електричної енергії для виведення феромагнітного осердя зі стану насичення; використання захисного відключення.

Висновки. При моделюванні ферорезонансних кіл особливу увагу слід приділяти нелінійній індуктивності. Особливо точно має бути представлена крива намагнічування через дуже велику чутливість ферорезонансного процесу до параметрів мережі. Характеристика намагнічування осердя трансформатора для розрахунків має бути отримана в результаті вимірювань на реальному ТН або шляхом моделювання його магнітних кіл.

Області існування ферорезонансних процесів для реального ТН типу НКФ-220 свідчать про необхідність розробки заходів захисту даного типу ТН від ферорезонансних перенапруг та надструмів.

Використання середовища моделювання АТР/ЕМТР дає змогу провести дослідження потенційно небезпечних ферорезонансних схем на можливість виникнення у них стійких ферорезонансних процесів, а також вибрати відповідні заходи щодо їх попередження.

Передбачається отримання областей існування ферорезонансних процесів для типових ТН номінальної напруги 220-750 кВ.

- Гашимов А.М., Бабаева А.Р. Анализ феррорезонансных процессов методами математического моделирования // Azərbaycan Respublikasının Prezidenti H.Ə.Əliyevin 80illik yubileyinə həsr olunmuş elmi konfransda. – Баку, 2003. – С. 201–204.

2. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
3. Кадомская К.П., Лантев О.И. Антирезонансные трансформаторы напряжения, эффективность применения. // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – № 6(42).
4. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.
5. Преображенский А.А. Магнитные материалы. – М.: Высш. шк., 1965. – 234 с.
6. Mariusz Stosur et al. ATP/EMTP Study of Ferroresonance Involving HV Inductive VT and Circuit Breaker Capacitance // Power Quality and Utilization, Journal. – 2008. – Vol. XIV, No 2.
7. Ph. Ferracci. Ferroresonance // Cahiers Techniques Schneider, Collection Technique Groupe Schneider, 1998. – No. 190.

УДК 621.311.4

А.Б. Бесараб¹, аспирант, **Ю.И. Тугай²**, канд. техн. наук

1 – Нац. техн. ун-т Украины «Киевский политехнический институт»,

пр. Победы, 37, Киев-56, 03056, Украина

2 – Ин-т электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Разработана математическая модель индуктивного трансформатора напряжения НКФ-220. Проведено моделирование феррорезонансных процессов в среде ATP/EMTP. Показано влияние начальных условий на установившийся феррорезонансный режим. Получены области существования феррорезонансных процессов для трансформатора НКФ-220. Библ. 7, рис. 4.

Ключевые слова: феррорезонанс, моделирование, ATP/EMTP.

О.В. Besarab¹, **Yu.I. Tugay²**

1 – National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute",

Peremogy, 37, Kyiv-56, 03056, Ukraine

2 – Institute of electrodynamics of National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

A mathematical model of the inductive voltage transforme NKF-220 has been developed. The simulation of ferroresonance processes in the medium ATP/EMTP has been hold. The effect of initial conditions on the established mode of ferroresonance has been proved. Ranges of the existence of ferroresonance processes transformer NKF-220 has been obtained. References 7, figures 4.

Keywords: ferroresonance, modeling, ATP/EMTP.

Надійшла 4.10.2011

Received 4.10.2011