

Є. М. Танкевич, д-р. техн. наук;
Г. М. Варський, канд. техн. наук;
В. В. Гречко

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВИБІР ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА СТРУМУ З ЦИФРОВИМ ВИХОДОМ

Розраховано оптимальну електромагнітну систему вимірювального трансформатора струму з цифровим виходом. Перевірено її роботу на математичній моделі.

Вступ

Розвиток сучасної світової електроенергетики пов'язаний із впровадженням новітньої концепції Smart Grids — інтелектуальної електричної мережі (ІЕМ), яка передбачає координацію дій виробників і споживачів електроенергії, акумулювальних пристроїв з метою забезпечення ефективного, екологічно чистого та надійного електропостачання [1]. Створення ІЕМ дозволяє на технологічному рівні об'єднувати електричні мережі споживачів і виробників в єдину автоматизовану систему, яка в реальному часі може відслідковувати і контролювати режими роботи усіх учасників процесу вироблення, передачі і споживання електроенергії, в автоматичному режимі оперативно реагувати на зміни режимних параметрів в енергосистемі і тим самим дозволяє здійснювати безперебійне електропостачання з максимальною економічною ефективністю при зниженні впливу помилок обслуговуючого персоналу [2]. Одним з важливих елементів ІЕМ є цифрова підстанція. Створення таких підстанцій це загальносвітова тенденція. Роботи в цьому напрямку ведуться у Європі, США, Китаї, Японії та інші. Ідея цифрової підстанції, як електроенергетичного об'єкту, полягає у створенні систем контролю, захисту і управління нового покоління, в яких вся інформація одержується, перероблюється і керує обладнанням у цифровому форматі [3]. Таким чином впровадження цифрових датчиків інформації про струми і напруги електроенергетичних об'єктів є необхідною умовою розвитку ІЕМ.

Особливості роботи ТС в умовах зменшеного навантаження

Одним з можливих рішень по реалізації цифрових датчиків інформації про струми є електронний трансформатор струму (ЕТС) [4]. Первинним датчиком струму у такій схемі може бути електромагнітний трансформатор струму (ТС), шунт, пояс Роговського, датчик Хола, магнітооптичний датчик, на основі використання ефекту Фарадея, та інші. На сьогоднішній день найдоцільнішим для використання у високовольтних електричних мережах є електромагнітний ТС, як найбільш розповсюджений та надійний первинний перетворювач струму.

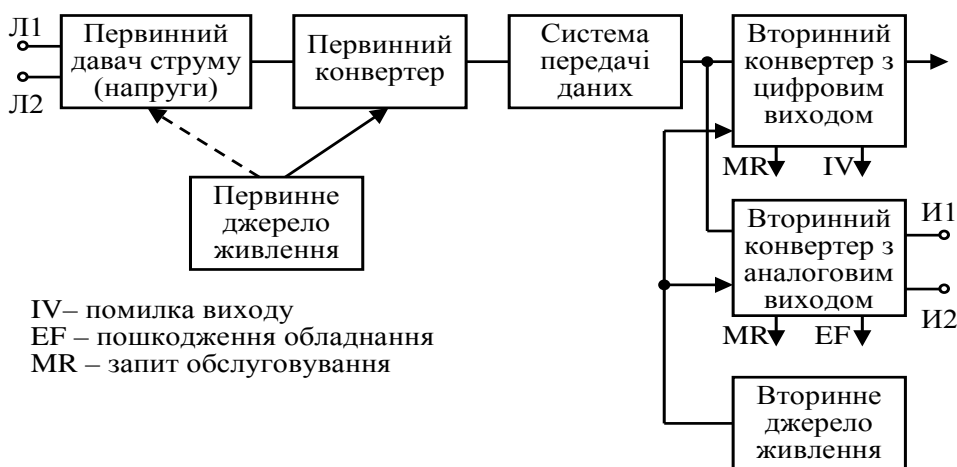


Рис. 1

Первинний конвертер ЕТС, для перетворення аналогових сигналів у цифрові, встановлюється безпосередньо на первинному обладнанні і забезпечує перетворення вторинного струму електромагнітного ТС у цифровий код. Довжина з'єднувальних проводів між ТС і первинним конвертором не перевищує декількох метрів, тому їх опором можна знехтувати. Вхідний опір проміжного (вторинного) перетворювача струм-напруга, побудованого на ТС з негативним зворотним зв'язком, який повинен знаходитись у первинному конверторі, практично визначається опором його первинної обмотки, і, зазвичай, ним також можна знехтувати. Отже, практично, навантаження первинного ТС буде визначатись лише внутрішнім опором його вторинної обмотки.

Добре відомо, що зменшення навантаження ТС, за відсутності виткової корекції, призводить до зменшення його похибок та розширенню діапазону робочих струмів. Зменшення похибок вимірювальних ТС підвищує точність обліку електроенергії і, як наслідок, сприяє підвищенню ефективності роботи енергосистеми. Для захисних ТС збільшується коефіцієнт граничної кратності і відповідно діапазон робочих струмів, тобто трансформатори будуть насичуватись при більших первинних струмах, а це забезпечує надійнішу роботу релейного захисту.

Зменшення навантаження вимірювальних ТС призводить також і до збільшення коефіцієнту безпеки приладів вторинної обмотки, що потребує додаткових заходів захисту вхідних кіл вторинних перетворювачів.

Якщо під час виготовлення ТС для забезпечення його класу точності було проведено виткову корекцію, то зменшення навантаження нижче 25 % номінального, як у нашому випадку, може призвести до збільшення його струмової похибки і навіть виходу ТС за межі класу точності. Тому у цьому разі необхідно передбачити встановлення додаткового навантаження не нижче 25 % номінального, або забезпечити введення поправочного коефіцієнта на виткову корекцію у подальшому перетворенні інформації [5].

Розрахунок електромагнітної системи ТС

Вищенаведені міркування стосуються вже встановлених ТС, які розраховувались на значні вторинні навантаження у відповідності до ДСТУ ГОСТ 7746-2003. Розглянемо, як впливає знижене вторинне навантаження на вибір електромагнітної системи ТС на напругу 220 кВ, призначеного для роботи у складі електронного трансформатора струму з цифровим виходом. Нехай при цьому необхідно забезпечити для первинного ТС з номінальним первинним струмом $I_{1\text{ном}} = 1000$ А клас точності 0,2S і номінальний коефіцієнт безпеки $K_{\text{Бном}} \geq 5$. ТС повинен забезпечувати вимоги з точності без використання виткової корекції, щоб уникнути впливу на похибки навантаження меншого 25 % номінального. Розрахунок електромагнітної системи ТС проводився по методикам, викладеним у [6, 7], для електротехнічної сталі 3413 і для нанокристалічного сплаву ММ-11Н, характеристики намагнічування яких показано на рис. 2а.

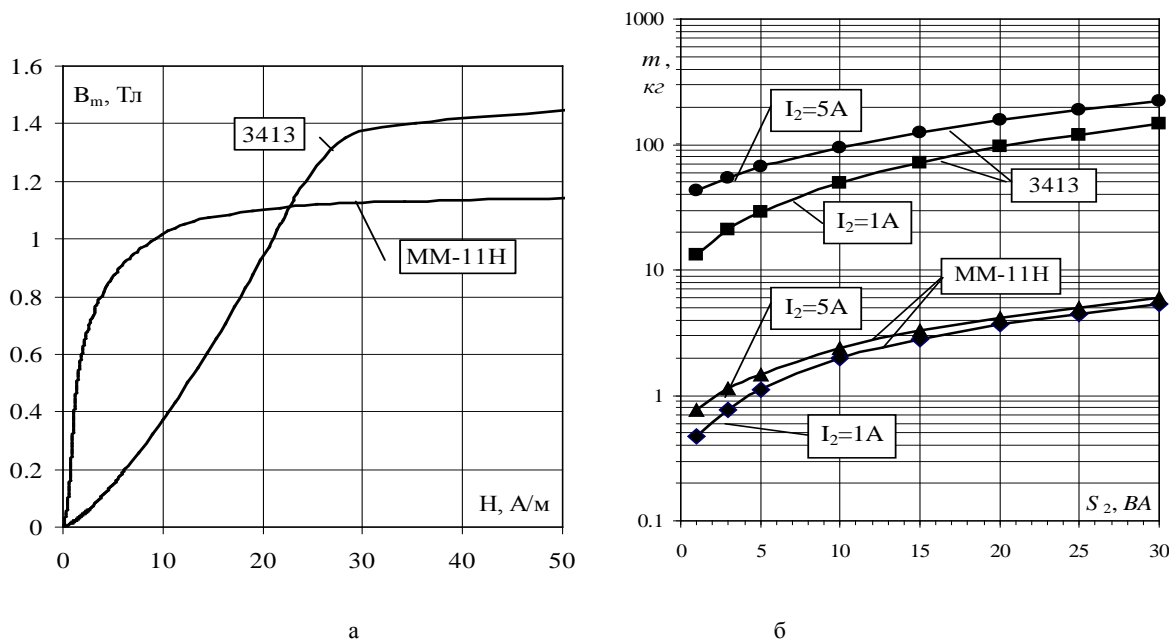


Рис. 2

Алгоритм розрахунку ТС, який об'єднує згадані методики, реалізований у математичному пакеті MathCad і знаходить оптимальні геометричні розміри магнітопроводу при заданому навантаженні і при найбільш важкій з точки зору забезпечення заданого класу точності або номінального коефіцієнта безпеки приладів вторинної обмотки, призначеної для вимірювання, чи номінальної граничної кратності вторинної обмотки, призначеної для захисту, величині первинного струму. Розрахунки показують, що використання нанокристалічного сплаву ММ-11Н з високою початковою магнітною проникністю під час виготовлення ТС заданого класу точності і заданим номінальним коефіцієнтом безпеки дозволяє значно зменшити (у нашому випадку більше ніж у 30 разів) масу магнітопроводу за однакових характеристик точності (рис. 26). Меншому навантаженню відповідає менша маса осердя, так зменшення вторинного навантаження ТС з 30 ВА до 1 ВА, зменшує масу його магнітопроводу в 7...20 разів як для осердь з електротехнічної сталі, так і для нанокристалічного сплаву. Розрахунок магнітопроводу із електротехнічної сталі 3413 показує, що найкритичнішим значенням первинного струму є $0,05I_{ном}$, при якому і визначається необхідний переріз осердя ТС. При цьому не вдається забезпечити заданий номінальний коефіцієнт безпеки $K_{Бном} = 5$, який у цьому випадку знаходиться у межах від 115 до 230 в залежності від навантаження. Для ТС з магнітопроводом із нанокристалічного сплаву найважчим виявилось забезпечення номінального струму безпеки $I_{Бном}$, для якого і визначався переріз осердя. Залежності маси магнітопроводів від вторинного навантаження наведені для $\cos \varphi = 1,0$, при якому вони трохи більші ніж для $\cos \varphi = 0,8$. З аналізу отриманих результатів розрахунків випливає, що меншому значенню номінального вторинного струму, за однакових вторинних навантажень, відповідають менші геометричні розміри і маса осердь. Тому під час вибору первинного датчика струму для ТС з цифровим виходом слід віддавати перевагу меншому значенню номінального вторинного струму $I_{2ном}$. Але мінімальна величина вторинного струму обмежена технологічними причинами, та завадостійкістю датчика. На сьогоднішній день його вторинний струм не може бути менше 1 А.

Враховуючи викладене вище, для подальшого аналізу обираємо ТС з номінальним вторинним струмом $I_{2ном} = 1$ А і номінальним навантаженням $S_{2ном} = 1$ ВА: один з осердям із нанокристалічного сплаву, другий з осердям із електротехнічної сталі 3413, які мають у своєму класі найменші розміри і масу.

Моделювання роботи ТС

Перевірка розрахунків ТС, вихідними величинами яких є розміри осердь, кількість витків вторинної обмотки та її опір, проводилась в усталеному режимі на вбудованій математичній моделі трансформатора (Saturable Transformer), що насичується, з бібліотеки блоків SimPowerSystem системи MATLAB+Simulink за схемою рис. 3. Перевірка проводилась при первинних струмах $0,01 I_{1ном}$, $0,05 I_{1ном}$, $0,20 I_{1ном}$, $1,0 I_{1ном}$, $1,2 I_{1ном}$ та вторинному навантаженні 1 ВА з $\cos \varphi = 1,0$.

Характеристики намагнічування магнітних матеріалів задавались у вигляді залежності потокозчеплення $\Psi = BS w_1$, де B — магнітна індукція матеріалу осердя (рис. 2а), S — площа його поперечного перерізу, а w_1 — кількість витків первинної обмотки, від намагнічуючого струму $i_{нам} = H/w_1$, де H — напруженість магнітного поля в осерді (рис. 2а), а l — довжина його середньої магнітної лінії. Струмова похибка ТС (current error) визначалась як різниця діючих значень вторинного (блок RMS3) і первинного (блок RMS2) струмів, віднесена до діючого значення первинного струму та помножена на відповідний нормуючий коефіцієнт (блоки Product1 та Gain2). Повна похибка ТС визначалась як діюче значення різниці вторинного і первинного струмів за допомогою блоків Gain, RMS, RMS1, Product, Gain3. Кутова похибка ТС визначалась як різниця фаз вторинного і первинного струмів, отриманих за допомогою блоків Fourier1 і Fourier2. Результати визначення похибок ТС показані на рис. 4а, б. Струмові похибки ТС на осерді із електротехнічної сталі і з нанокристалічного сплаву набагато менші границь заданого класу 0,2 S (рис. 4а). Для ТС на сталі це пояснюється тим, що переріз осердя вибирався з умови забезпечення кутової похибки при $0,05I_{1ном}$ (рис. 4б), як найважчої умови, тому з усіма іншими значеннями первинного струму струмові і кутові похибки ТС будуть напевно знаходитись у межах класу точності.

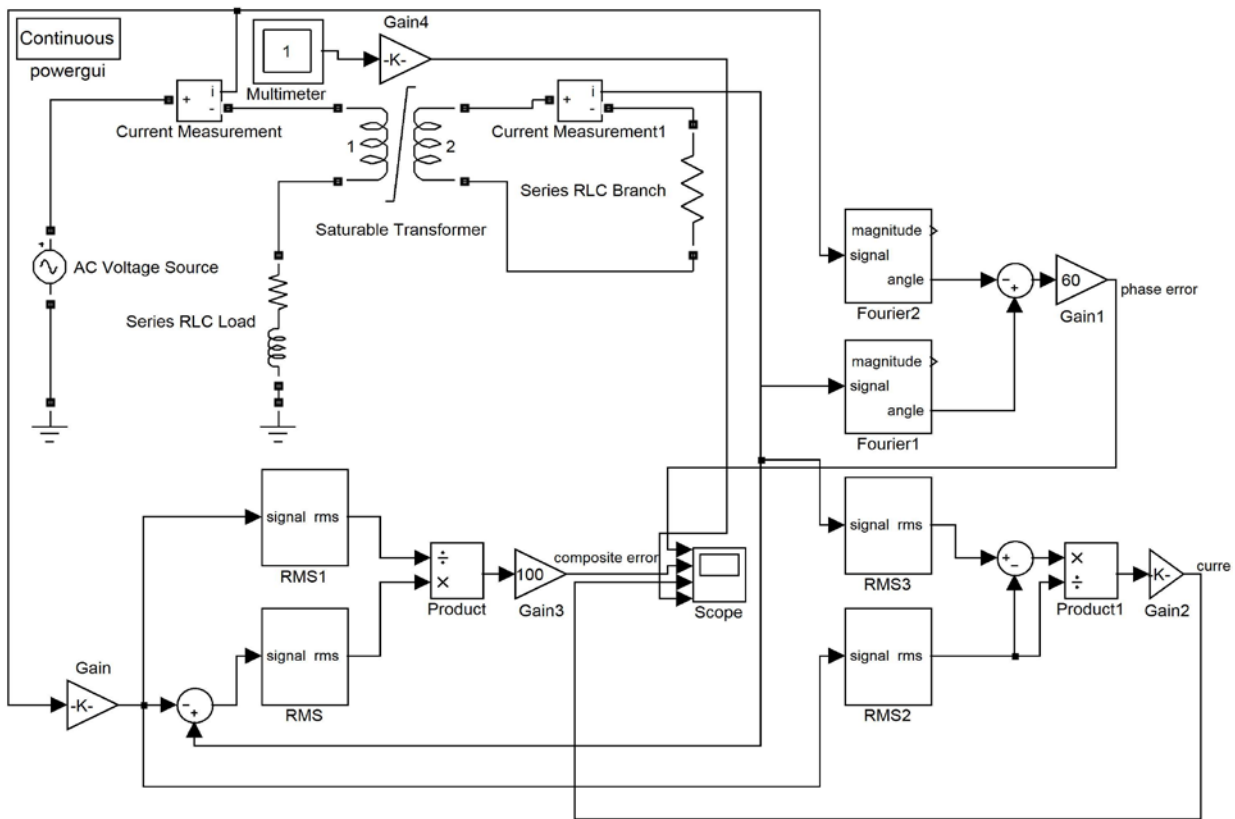


Рис. 3

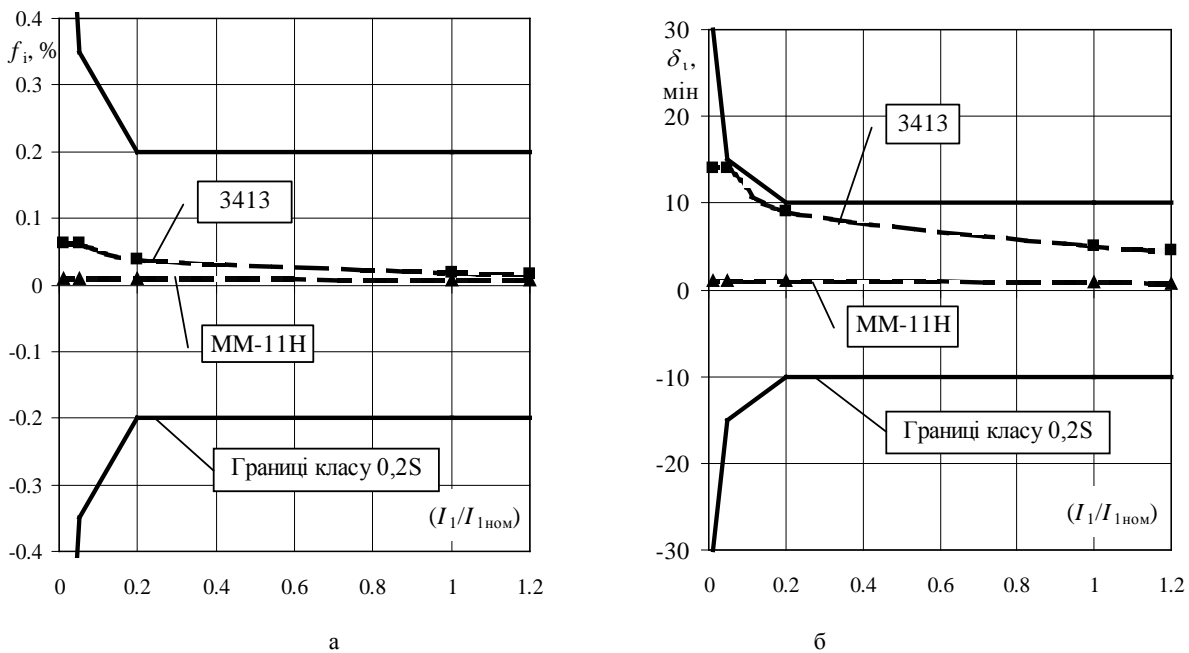


Рис. 4

Висновки

Проведене в системі MATLAB+Simulink моделювання роботи ТС підтвердило правильність розроблених алгоритмів проектування вимірювальних трансформаторів. Абсолютна похибка між розрахунком і моделюванням не перевищує 0,01 % для струмової і 2—3 мін. для кутової похибок. Отримані результати показують, що, проектуючи електромагнітну систему вимірювального трансформатора струму з цифровим виходом, за рахунок зменшеної величини навантаження можна досягти значного (в 7—20 разів) зменшення маси магнітопроводу зі забезпеченням заданих зна-

чень струмових і кутових похибок як для осердь із нанокристалічного сплаву, так і для осердь з електротехнічної сталі. Розробляючи вимірювальні ТС високих класів точності (0,2S і вище), слід надавати перевагу осердям із нанокристалічного сплаву, які при мінімальних розмірах, за рахунок високої магнітної проникності, забезпечують мінімальні похибки. З використанням цих сплавів можна достатньо легко забезпечити заданий номінальний коефіцієнт безпеки приладів менший 5, що для електротехнічної сталі неможливо. Осердя з електротехнічної сталі мають перевагу при розробці і виготовленні захисних ТС, забезпечуючи необхідний номінальний коефіцієнт граничної кратності і задану точність при струмах короткого замикання за рахунок високої індукції насичення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Стогній Б. С. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, С. П. Денисюк // Технічна електродинаміка. — 2010. — № 6. — С. 44—50.
2. ФСК и РАН разработают систему с интеллектуальной электросетью [Електронний ресурс] / Энергоньюс. — Режим доступу : <http://energo-news.ru/archives/31663>.
3. ФСК ЕЭС решило создать в России интеллектуальную электросеть [Електронний ресурс] / Интернет газета Newsbaru. — Режим доступу : <http://www.newslab.ru/news/304116>.
4. International Standard IEC 60044-8, Instrument Transformers part 8: Electronic current transformers, First edition, 07-2002.
5. Вплив стандарту МЭК61850 на вимоги до первинних вимірювальних перетворювачів струму і напруги / С. М. Танкевич, Г. М. Варський, І. В. Яковлева [та ін.] // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск : «Проблеми сучасної електротехніки». — 2010. — Ч. 2. — С. 53—56.
6. Варський Г. М. Вимірювальний трансформатор струму з заданим мінімальним коефіцієнтом безпеки приладів / Г. М. Варський, С. М. Танкевич, С. В. Рябчук // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України : зб. наук. пр. — К. : ІЕД НАНУ. — 2008. — Вип. 21. — С. 81—85.
7. Бачурин Н. И. Трансформаторы тока / Н. И. Бачурин. — Л. : Энергия, 1974. — 376 с.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Стаття надійшла до редакції 10.10.11

Рекомендована до друку 9.11.11

Танкевич Євгеній Миколайович — провідний науковий співробітник, **Варський Григорій Мстиславович** — старший науковий співробітник, **Гречко В'ячеслав Вадимович** — інженер.

Відділ автоматизації електричних систем, Інститут електродинаміки НАН України, Київ