

TRANSFORMING THE HIGHER HARMONIC COMPONENTS OF THE ELECTROMAGNETIC TRANSFORMERS (EXPERIMENTAL STUDY)

V. Brzhezytski, Y. Garan, I. Maslychenko

National Technical University of Ukraine "Kyiv Politechnical Institute"

Key words: Voltage harmonic components Voltage conversion Electromagnetic transformers Scale converters of voltage	ABSTRACT The paper analyses the problems and questions of transformation of the higher harmonic components of voltage by means of electromagnetic transformers. The essential distortion of transformation of the higher harmonic components of voltage at commercial-frequency voltage conversion is experimentally proven. The recommendations concerning definition of the higher harmonic components of voltage in high-voltage networks are given.
Article history: Received 18.12.2012 Received in revised form 18.02.2013 Accepted 04.03.2013	
Corresponding author: E-mail: npnuht@ukr.net	

ТРАНСФОРМУВАННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІЧНИХ СКЛАДОВИХ НАПРУГИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ (ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ)

В.О. Бржезицький, Я.О. Гаран, І.М. Маслоченко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

В статті розглянуті проблеми й питання трансформування вищих гармонічних складових напруги за допомогою електромагнітних трансформаторів, експериментально доведено суттєве спотворення трансформування вищих гармонічних складових напруги при трансформації напруги промислової частоти, надані рекомендації щодо визначення вищих гармонічних складових напруги у високовольтних електромережах.

Ключові слова: гармонічні складові напруги, трансформація напруги, електромагнітні трансформатори, масштабні перетворювачі напруги

Від якості електроенергії в значній мірі залежить ресурс обладнання, яке живиться електроенергією (переважна частина сучасного технологічного обладнання), проте, навіть якщо постачальник електроенергії дотримується вимог стандартів з якості електроенергії України, або сучасних міждержавних стандартів, він відповідає за її якість лише на високій напрузі, а чутливе до якості електроенергії обладнання працює переважно на більш низьких напругах (як правило, 0,4 – 10 кВ). Трансформація напруги між постачальником та обладнанням споживача здійснюється за допомогою трансформаторів електромагнітного типу, проте, оскільки основною задачею таких трансформаторів є передача

потужності на промисловій частоті, при їх конструюванні питання якості електроенергії, як правило, не враховується.

Також, слід відзначити, що хоча напруга промислової частоти є основною складовою трансформованої напруги, в мережі живлення електрообладнання споживача постійно присутні гармонічні складові напруги, наявність яких в мережі є наслідком багатьох факторів — від характеристик навантаження споживача до якості електроенергії, яка надходить від постачальника. Окрім цих двох основних факторів існує також фактор спотворення гармонічних складових напруги високовольтними трансформаторами напруги або силовими трансформаторами на підстанції споживача. Вищі гармонічні складові напруги здатні заподіяти шкоду не тільки високовольтній ізоляції працюючого електрообладнання, а й вносити перешкоди в роботу автоматичних систем керування процесами, систем моніторингу стану обладнання, систем аварійного спрацьовування, тощо. В даній статті досліджений вплив високовольтних трансформаторів напруги електромагнітного типу на трансформування вищих гармонічних складових напруги.

ВИМОГИ СТАНДАРТІВ

Вищі гармонічні складові напруги є одним з показників якості електроенергії, які регламентовані ГОСТ 13109 [1], ГОСТ Р 51317.4.30-2008 [2], ІЕС 61000-4-30:2008 [3], EN 61000-4-30:2009 [4] та іншими стандартами. Наявність тих чи інших гармонічних складових напруги в електромережі відповідного класу напруги за ГОСТ 13109, який є діючим в Україні та кількох країнах СНД, не може перевищувати певних норм, оскільки це може становити загрозу електрообладнанню, яке працює в даній електромережі. Визначення показників якості електроенергії у відповідності до ГОСТ 13109 та міждержавних стандартів дещо відрізняються, проте всі стандарти, які потребують визначення показників якості електроенергії, у тому числі, гармонічних складових напруги, у високовольтних електромережах, вимагають застосування відповідних масштабних перетворювачів високої напруги, здатних з допустимою похибкою трансформувати не тільки напругу промислової частоти, а й вищі гармонічні складові напруги, і також швидкісні перехідні (імпульсні) процеси.

На даний час в Україні з метою масштабного перетворення високої напруги для визначення показників її якості використовують серійні трансформатори напруги (наприклад, типу НКФ), які встановлені на багатьох підстанціях й працюють одночасно і в режимі вимірювання високої напруги, і в режимі приєднання до систем автоматичного управління й захисту підстанції. Проте, слід звертати увагу на те, що електромагнітна система високовольтного трансформатора напруги не призначена для масштабного перетворення високої напруги, частота якої значно перевищує промислову (не кажучи про імпульсні процеси, які електромагнітний трансформатор напруги взагалі може «не помітити»). Була поставлена задача дослідити експериментально масштабне перетворення гармонічних складових напруги (у відповідності до ГОСТ 13109 — до 40-ї гармоніки) високовольтними трансформаторами напруги електромагнітного типу.

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Теоретичні основи трансформування вищих гармонічних складових напруги електромагнітними трансформаторами були досить детально досліджені у дисертаційній роботі Бржезицького В.О. [5], в якій в ході теоретичних розрахунків та проведення ряду експериментів була одержана нелінійна взаємозалежність миттєвих значень магніторухлившійної сили та основного магнітного потоку електромагнітного трансформатора. Було виявлено, що ця взаємозалежність є головною причиною нестабільності коефіцієнтів трансформації високовольтних трансформаторів напруги (в тому числі, для вищих гармонічних складових напруги). В роботі досліджувалась трансформація напруги промислової частоти та напруги, модульованої гармонічними складовими напруги, електромагнітним трансформатором на осерді з електротехнічної сталі при різних рівнях магнітної індукції. Експериментально визначена за допомогою феррометра динамічна петля гістерезису електротехнічної сталі 3404 (товщина 0,35 мм) для вихідних рівнів амплітуди магнітної індукції $B_{m1} = 0,8$ Тл та $B_{m1} = 1,3$ Тл при дії чисто синусоїдальної

магнітної індукції частоти 50 Гц, що відповідає графіку кривої магнітної індукції I (першої гармоніки) на рис. 1 в).

Експериментально визначена динамічна петля гістерезису цієї ж сталі для вихідних рівнів амплітуди магнітної індукції $B_{ml} = 0,8$ Тл та $B_{ml} = 1,3$ Тл при наявності, окрім чисто синусоїдальної магнітної індукції частоти 50 Гц, 3-ї гармоніки з коефіцієнтом амплітуди 1,7 %, початкова фаза якої співпадає з фазою основної гармоніки, що відповідає графіку кривої магнітної індукції I (першої гармоніки) та 2 (третьої гармоніки) на рис. 1 а).

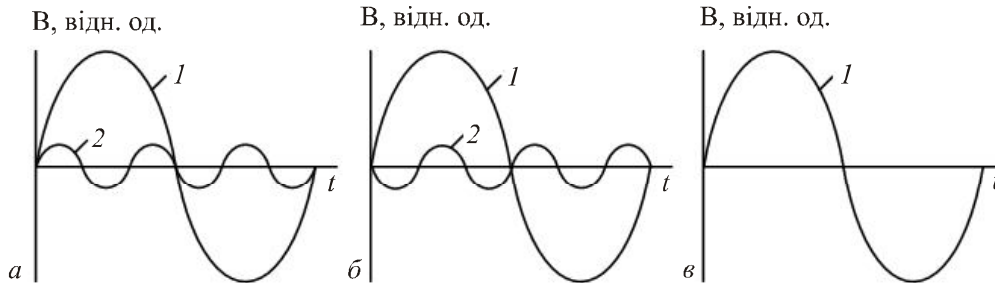


Рис. 1 Графіки узгодження кривих магнітної індукції при експериментальному дослідженні динамічної петлі гістерезису сталі 3404 товщиною 0,35 мм

Експериментально визначена динамічна петля гістерезису електротехнічної сталі 3404 для вихідних рівнів амплітуди магнітної індукції $B_{ml} = 0,8$ Тл та $B_{ml} = 1,3$ Тл при наявності, окрім чисто синусоїдальної магнітної індукції частоти 50 Гц, 3-ї гармоніки з коефіцієнтом амплітуди 1,7 %, початкова фаза якої відрізняється від фази основної гармоніки на π радіан, що відповідає графіку кривої магнітної індукції I (першої гармоніки) та 2 (третьої гармоніки) на рис. 1 б).

Навіть незначне додавання третьої гармоніки індукції з коефіцієнтом амплітуди 1,7 % призводить до суттєвого нелінійного спотворення динамічної петлі гістерезису сталі. При цьому рівень та форма спотворень значно підсилюється з ростом вихідного рівня магнітної індукції основної гармоніки. Зважаючи на те, що вихідний рівень магнітної індукції в електромагнітних трансформаторах напруги сягає 1,5 Тл і більше, спотворення магнітних характеристик сталі в цьому випадку, навіть при нормованих ГОСТ 13109 рівнях гармонік, може сягати 20 – 30 %.

За результатами проведених в роботі [5] теоретичних досліджень можна зробити наступні висновки:

При відсутності тієї або іншої вищої гармонічної k -ї складової вхідної напруги трансформатора вихідна k -а гармонічна складова напруги в загальному випадку не буде дорівнювати нулю (!).

Для великих значень k ($k \geq 20$) реактивні параметри розсіювання обмоток будуть обмежувати вихідну напругу вищих гармонік трансформатора.

При переході до режимів максимальної напруги високовольтного трансформатора напруги вплив вищих гармонічних складових напруги буде різко підсилюватись.

При використанні значного активного навантаження вторинної обмотки високовольтного трансформатора напруги вплив вищих гармонічних складових напруги буде зменшуватись.

Було прийняте рішення експериментального дослідження одержаних теоретичних висновків на серійному трансформаторі напруги типу НКФ, який є дуже поширеним електрообладнанням на підстанціях України.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ДОСЛІДЖЕННЯ

В якості досліджуваного трансформатора був обраний трансформатор НКФ-220-ІІУ1. Досліджування проводилось на високовольтному випробувальному полі ВАТ «Запорізький завод високовольтної апаратури». Метою дослідження було порівняння середньоквадратичних значень окремих гармонік, одержаних за допомогою еталонного масштабу-

ного перетворювача високої напруги змінного струму (на основі високовольтного еталонного конденсатора) з аналогічними значеннями гармонік, одержаними на низьковольтному виході досліджуваного трансформатора. Слід відзначити, що дослідження гармонічних складових напруги проводилось в усталених режимах електромережі, тому синхронізація осцилографів, за допомогою яких аналізувались сигнали, не проводилась. Разом з тим, була досліджена значна статистична вибірка одержаних значень. Схема установки експериментального дослідження трансформації гармонік трансформатором НКФ-220 наведена на рис. 2:

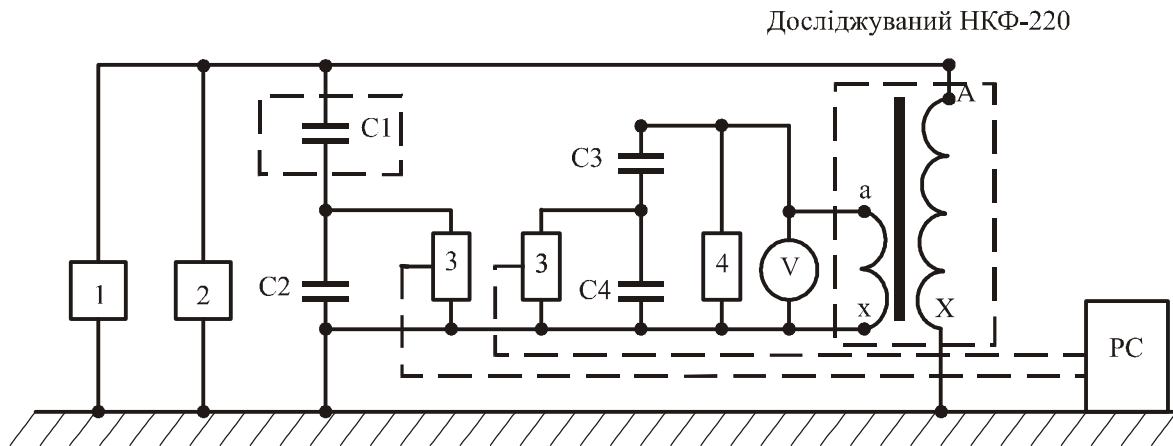


Рис. 2 Схема експериментального дослідження трансформації вищих гармонічних складових напруги трансформатором НКФ-220.

1 — джерело високої напруги; 2 — навантажувальний трансформатор НКФ-220; 3 — осцилографи-аналізатори гармонік; 4 — магазин навантаження; C1 — високовольтний еталонний конденсатор; C2, C3, C4 — магазини ємностей; V — вольтметр; PC — комп'ютер.

В зібраній згідно рис. 2 схемі в якості джерела живлення 1 була використана установка з силовим трансформатором типу PEOL-350/350 та регулюючим трансформатором типу SEOM-165/380. В якості навантажувального трансформатора 2 був використаний аналогічний досліджуваному трансформатору НКФ-220-ПУ1. В якості осцилографів-аналізаторів гармонік були використані прилади типу USB-oscill. В якості навантаження 4 був використаний магазин навантаження типу МН-1200/100/√3. В якості конденсатора C1 був використаний високовольтний еталонний газонаповнений конденсатор типу MCF 60/600P ємністю 57,25 пФ. В якості ємностей C2, C3, C4 були використані магазини типу P5025. В якості вольтметра V був використаний прилад типу ЭЗ77. В якості комп'ютера PC був використаний переносний комп'ютер зі спеціалізованим програмним забезпеченням аналізу гармонік.

Дослідження проводились для холостого ходу трансформатора НКФ-220 та для режимів, в яких його вторинні номінальні навантаження дорівнювали 25, 50, 100, 150, 200, 300 та 400 В·А при $\cos\varphi = 0,8$. Всі режими вторинного навантаження досліджуваного трансформатора проводились при 80 %, 100 % та 120 % від номінального значення напруги НКФ-220 (відповідно, 101,6; 127,0; 152,4 кВ). Ємності C2 (0,30915 мкФ) подільника напруги, приєднаного до виходу високовольтного конденсатора, та C3 (0,1 мкФ) і C4 (0,145 мкФ) подільника напруги, приєднаного до виходу 100/√3 В досліджуваного трансформатора, забезпечували приведення вхідних напруг осцилографів до практично однакових значень першої гармоніки. Для кожного значення первинної напруги та кожного значення вторинного навантаження досліджуваного трансформатора фіксувалось по $m = 10$ значень для кожної з гармонік (у Вольтах) як на виході досліджуваного трансформатора, так і на виході ємнісного еталонного подільника напруги.

В результаті статистичної обробки результатів дослідження були одержані залежності загальної похибки визначення для кожної гармонічної складової напруги від первинної напруги та вторинного навантаження досліджуваного трансформатора, розраховані за наступною формулою:

$$\Delta K_{U(n)} = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{K_{U(n)mp.i} - K_{U(n)em.i}}{K_{U(n)em.i}}}{m} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де $K_{U(n)mp.i}$ — коефіцієнт n -ї гармонічної складової напруги, визначений за допомогою досліджуваного трансформатора; $K_{U(n)em.i}$ — коефіцієнт n -ї гармонічної складової напруги, визначений за допомогою еталонного конденсатора. На рисунках 3 та 4 представлені залежності похибки визначення 3-ї та 19-ї гармонічних складових напруги ΔK_U , у відсотках, від вторинного номінального навантаження P для входних напруг 80 %, 100 % та 120 % від номінальної НКФ-220.

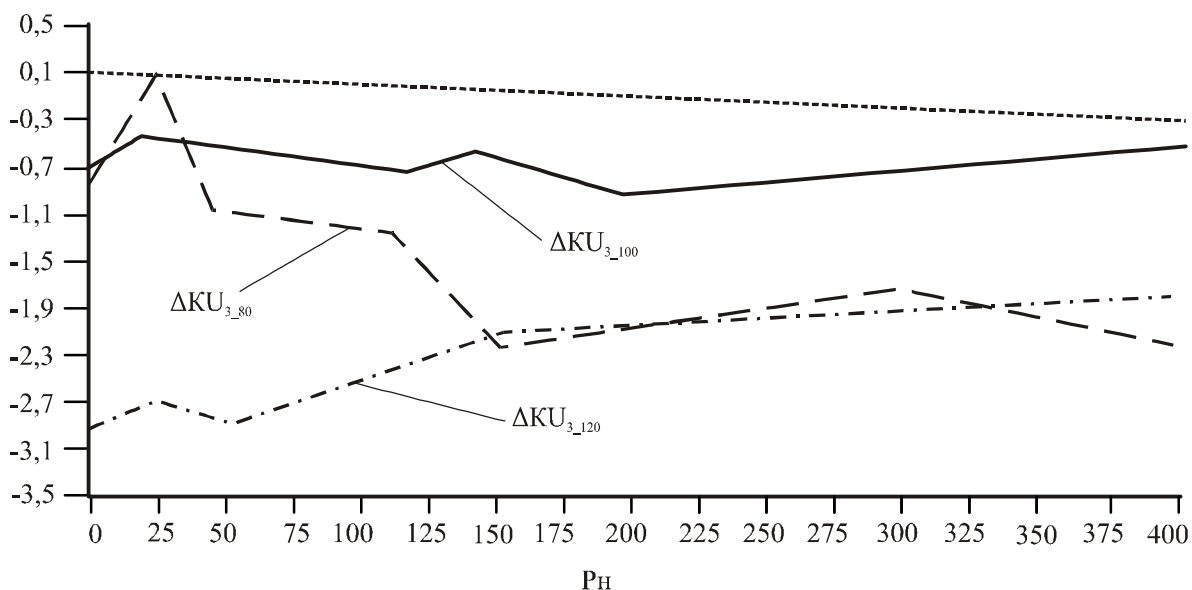


Рис. 3 Залежність похибки визначення 3-ї гармонічної складової напруги ΔK_U , у відсотках, від вторинного номінального навантаження P , В·А, для входних напруг 80 %, 100 % та 120 % від номінальної.

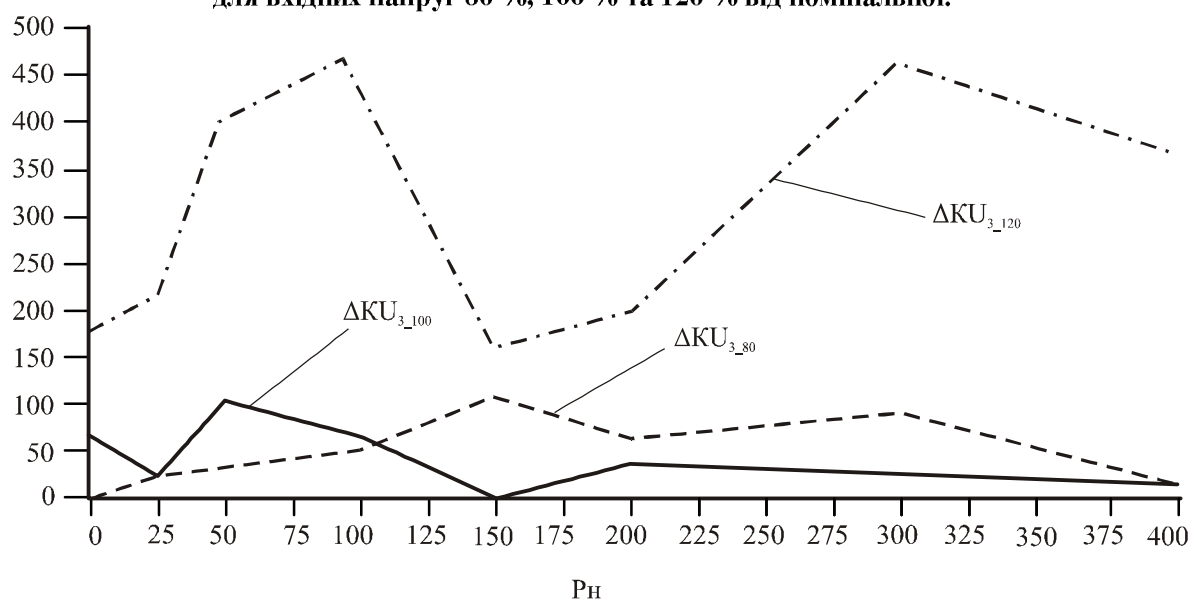


Рис. 4 Залежність похибки визначення 19-ї гармонічної складової напруги ΔK_U , у відсотках, від вторинного номінального навантаження P , В·А, для входних напруг 80 %, 100 % та 120 % від номінальної.

На рисунку 4 можна побачити дуже суттєву відносну похибку визначення 19 гармоніки, проте абсолютна похибка визначення гармоніки, коефіцієнт якої K_U менше 1 %, має бути, згідно ГОСТ 13109, не більше 0,05 % від номінальної напруги, тобто, для напруги на виході $100/\sqrt{3}$ В трансформатора НКФ-220, абсолютна похибка визначення гармонік, $K_{U(n)}$ яких менше 1 %, має бути не більше $\pm 0,028868$ В. Дана умова не виконується для ряду гармонік при вхідній напрузі, яка дорівнює 120 % від номінальної, в тому числі, і для 19-ї.

Висновки

Трансформація вищих гармонічних складових напруги трансформатором НКФ-220 відповідає за точністю вимогам ГОСТ 13109 у режимах ненасичення магнітопроводу, тобто в діапазоні 80 — 100 % від номінальної напруги.

Теоретичні висновки, одержані під час досліджень трансформування гармонічних складових напруги [5], знайшли своє підтвердження при експериментальному дослідженні зразка серійного трансформатора напруги типу НКФ.

Одержані результати дають змогу стверджувати про неможливість використання трансформаторів напруги електромагнітного типу для визначення всіх показників якості електроенергії у високовольтних електромережах та дають застереження щодо використання їх для визначення гармонічних складових напруги лише в режимах ненасичення магнітопроводу.

Література

1. ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».
2. ГОСТ Р 51317.4.30-2008 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии».
3. IEC 61000-4-30:2008 «Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-30: Testing and measurement techniques — Power quality measurement methods».
4. EN 61000-4-30:2009. Electromagnetic compatibility (EMC). Testing and measurement techniques. Power quality measurement methods
5. Бржезицкий В.А. Прецизионные масштабные измерительные преобразователи высокого напряжения переменного тока/ Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. — Киевский политехнический институт. — Киев, 1992. — 513 с.

ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ)

В.А. Бржезицкий, Я.А. Гаран, И.Н. Маслюченко
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

В статье рассмотрены проблемы и вопросы трансформирования высших гармонических составляющих напряжения с помощью электромагнитных трансформаторов, экспериментально показана возможность существенного искажения трансформирования высших гармонических составляющих напряжения при трансформации напряжения промышленной частоты, представлены рекомендации относительно определения высших гармонических составляющих напряжения в высоковольтных электросетях.

Ключевые слова: гармонические составляющие напряжения, трансформация напряжения, электромагнитные трансформаторы, масштабные преобразователи напряжения