

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

РУДЕВІЧ НАТАЛІЯ ВАЛЕНТИНІВНА

УДК 621.314

**ЗМЕНШЕННЯ ПОХИБОК, ОБУМОВЛЕНИХ ВИСОКОВОЛЬТНИМИ
ТРАНСФОРМАТОРАМИ СТРУМУ ТА НАПРУГИ, ПРИЄДНАННЯМ ДО
ЇХНІХ ВТОРИННИХ КІЛ КОМПЕНСУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ**

Спеціальність 05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації енергосистем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», МОН України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, професор

Кизилів Володимир Улянович,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри автоматизації енергосистем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Сивокобиленко Віталій Федорович,

Донецький національний технічний університет МОН України, завідувач кафедри електричних станцій;

кандидат технічних наук, доцент

Лазуренко Олександр Павлович,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», декан електроенергетичного факультету.

Захист відбудеться 02.07.2009 року о 14-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.050.06 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий 01.06. 2009 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

А.А. Мінченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Наявність похибок, обумовлених високовольтними вимірювальними трансформаторами струму та напруги, призводить до значної відмінності вимірюваних електричних величин, таких як активна потужність та електроенергія, від дійсних їх значень у високовольтних мережах енергосистем. Зменшення цих похибок надає можливість підвищити точність вимірювань, що в свою чергу призведе до більш правильного визначення плати за спожиту електроенергію, якості електроенергії, втрат в мережах та до більш точнішого регулювання потужностей генераторів на електростанціях, що особливо важливо в умовах енергоринку.

Тисячі вимірювальних трансформаторів струму та напруги, які сьогодні експлуатуються в електроенергетичних системах, працюють в класах точності 0.2, 0.5 і їх похибки є визначальними при вимірюванні енергії та потужності. Підвищення точності існуючих вимірювальних трансформаторів за рахунок конструктивного та технологічного вдосконалення досягло меж сьогоднішніх можливостей. Отримання більш високої точності можливе у разі застосування електронної компенсації похибки. Існуючі методи електронної компенсації практично не використовуються для високовольтних вимірювальних трансформаторів, оскільки основний елемент схем компенсації – операційний підсилювач, не в змозі забезпечити потужність, що вимагають діючі стандарти.

Отже, використання електронної компенсації похибки для високовольтних вимірювальних трансформаторів, де операційний підсилювач забезпечує потужність тільки для частини навантаження, яка потребує високу точність перетворення, є актуальною задачею та складає напрямок дослідження дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі автоматизації енергосистем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» в рамках науково-дослідної роботи по держбюджетним темам МОН України «Розробка пристрою оптимальної компенсації додаткових втрат електроенергії» (№ ДР 0105U000578), де здобувач була відповідальним виконавцем, та «Науково-технічні основи та розробка високовольтних вимірювальних перетворювачів струму на принципово нових фізичних та інформаційних засадах» (№ ДР 0107U000588), де здобувач була виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою даного дослідження є розробка компенсуювальних пристроїв, приєднання яких до вторинних кіл високовольтних вимірювальних трансформаторів струму та напруги дозволяє зменшити похибки, що обумовлені вимірювальними трансформаторами.

Поставлена в роботі мета вимагає вирішення наступних задач:

- розробити класифікацію існуючих способів зменшення похибок вимірювальних трансформаторів струму та вимірювальних трансформаторів напруги;
- удосконалити методи електронної компенсації похибок вимірювальних трансформаторів струму та напруги;

- розробити схеми пристроїв електронної компенсації похибок високовольтних вимірювальних трансформаторів струму та напруги;

- для аналізу роботи та визначення параметрів пристроїв електронної компенсації похибок високовольтних вимірювальних трансформаторів струму та напруги розробити їх математичні моделі з урахуванням сімейства петель гістерезіса;

- розробити алгоритми розрахунку параметрів елементів пристроїв електронної компенсації похибок високовольтних вимірювальних трансформаторів струму та напруги.

Об'єкт дослідження – високовольтні вимірювальні трансформатори струму та напруги.

Предмет дослідження – компенсувальні пристрої у вторинних колах високовольтних вимірювальних трансформаторів струму та напруги.

Методи дослідження. Використовувались основні положення теорії електричних кіл для аналізу роботи пристроїв електронної компенсації похибок високовольтних вимірювальних трансформаторів струму та напруги. Використовувалась математична модель процесів в феромагнітному осерді вимірювальних трансформаторів для розробки математичної моделі роботи пристроїв електронної компенсації похибок високовольтних вимірювальних трансформаторів струму та напруги. Метод малого параметру для вирішення диференційного нелінійного рівняння, що описує процеси в трансформаторі. Розкладання функцій, що описують процеси в осерді вимірювальних трансформаторів, в ряд Тейлора для визначення параметрів пристроїв електронної компенсації похибок високовольтних вимірювальних трансформаторів струму та напруги.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- удосконалено метод електронної компенсації похибки вимірювального трансформатора напруги, що базується на порівнянні вторинної напруги трансформатора з вторинною напругою компенсувального вимірювального трансформатора напруги. Від існуючого він відрізняється тим, що формується напруга для відокремленої частини навантаження, що робить його придатним для високовольтного трансформатора;

- удосконалено метод електронної компенсації похибки вимірювального трансформатора струму, що базується на формуванні струму намагнічування трансформатора та корекції ним результатів перетворення. Від існуючого він відрізняється тим, що корекція здійснюється для відокремленої частини навантаження, що робить його придатним для високовольтного трансформатора;

- обґрунтовані співвідношення параметрів компенсувальних пристроїв для відокремленої частини навантаження вимірювальних трансформаторів струму та напруги, при яких досягається повна компенсація похибок.

Практичне значення отриманих результатів. Удосконалені в роботі методи доведені до схемотехнічного рішення, що дозволяє створювати пристрої електронної компенсації похибок високовольтних вимірювальних трансформаторів струму та напруги, використання яких в високовольтних

мережах енергосистем дозволить підвищити точність перетворення струму та напруги. Отримано три патенти на винахід України на пристрої, що розроблені на підставі удосконалених методів.

Розроблені алгоритми розрахунку параметрів елементів пристроїв електронної компенсації похибок високовольтних вимірювальних трансформаторів струму та напруги можуть знайти своє втілення в виробництві на заводах, що випускають трансформатори.

Результати роботи впроваджені в розробках пристроїв компенсації реактивної потужності, які виготовляються фірмою «Електросфера» (м. Київ). Отримані в дисертації результати використовуються в навчальному процесі кафедри автоматизації енергосистем НТУ «ХПІ».

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, які містяться в дисертації одержані здобувачем самостійно. Серед них:

- розроблення класифікації схем вимірювальних трансформаторів струму та напруги з електронною компенсацією похибки;
- удосконалення методів електронної компенсації похибок вимірювальних трансформаторів струму та напруги з метою використання їх для високовольтних трансформаторів;
- побудова схем пристроїв електронної компенсації похибок високовольтних вимірювальних трансформаторів струму та напруги;
- розроблення математичної моделі роботи пристроїв компенсації похибок високовольтних вимірювальних трансформаторів струму та напруги;
- обґрунтування співвідношень параметрів пристроїв електронної компенсації похибок високовольтних вимірювальних трансформаторів струму та напруги.

Апробація результатів. Результати досліджень, що викладені в дисертації, доповідались і обговорювались на: XIV міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2005 р.), міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (Харків, 2007 р., 2008 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Эффективность и качество электроснабжения промышленных предприятий» (Маріуполь, 2007 р.), II міжнародній науково-практичній конференції «Электрификация железнодорожного транспорта» (п. Місхор, АР Крим, 2008 р.), на науково-технічному семінарі кафедр «Електричні станції» та «Електричні системи та мережі» Донецького національного технічного університету (Донецьк, 2008 р.), засіданні кафедри автоматизації енергосистем НТУ «ХПІ» (Харків, 2009 р.)

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 9 друкованих праць, з них 6 статей у фахових наукових виданнях ВАК України, 3 патенти на винахід України.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи становить 189 сторінок, у тому числі 44 рисунки та 17 таблиць по тексту,

списку використаних джерел з 82 найменувань на 9 сторінках та 6 додатків на 25 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність проблеми, яка вирішується в дисертаційній роботі. Сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт та предмет дослідження, зазначено методи дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено дані про апробацію та публікації основних результатів роботи.

В **першому розділі** розглянуто роль вимірювальних трансформаторів струму та напруги в метрологічному забезпеченні визначення параметрів режиму енергосистем. Визначальний внесок в утворення похибки передачі інформації про струм та напругу роблять електромагнітні вимірювальні трансформатори, які є основним електричним обладнанням енергосистем.

Значний вклад в теорію електромагнітних вимірювальних трансформаторів внесли такі відомі вчені: Стогній Б.С., Афанасьєв В.В., Казанський В.Е., Сирота І.М., Вавін В.Н. Певний доробок в розробку методів аналітичного визначення гістерезисних петель належить Безсонову Л.А. Роботи, пов'язані з електронною компенсацією похибки вимірювальних трансформаторів, належать таким вченим: Лейтман М.Б., Ванін В.К., Daniel Slomovitz.

В роботі були розглянуті існуючі способи зменшення похибок вимірювальних трансформаторів струму (ВТС) та напруги (ВТН), класифікація яких наведена на рис. 1 та рис. 2.

На підставі порівняльного аналізу було показано, що найбільш ефективним і не затратним способом є електронна компенсація похибки. Усі існуючі схеми вимірювальних трансформаторів струму з електронною компенсацією похибки були класифіковані по принципу дії, а саме, де осердя не перемагнічується, і, де два осердя перемагнічуються з однаковою зміною швидкості. Схеми вимірювальних трансформаторів напруги з електронною компенсацією похибки також були розділені по принципу дії: диференційні схеми і схеми, де компенсація падіння напруги здійснюється в первинній і вторинній обмотках окремо.

Розгляд трансформаторів струму та напруги з електронною компенсацією похибок показав, що використання існуючих схем для високовольтних вимірювальних трансформаторів обмежено, що пов'язано з обмеженою можливістю операційних підсилювачів (ОП), які є основними елементами цих схемних рішень. З точки зору надійності, доцільно використання такої компенсації, коли операційний підсилювач створює не всю потужність трансформатора, а тільки для частини навантаження, яка потребує високу точність перетворення.

У **другому розділі** удосконалено метод електронної компенсації похибки вимірювального трансформатора напруги, що придатний для високовольтного

вимірювального трансформатора напруги (ВВТН), на підставі якого розроблено схему пристрою електронної компенсації похибки ВВТН (рис. 3).

Принцип роботи пристрою полягає в наступному. Напруга з дільника на резисторі R_2 порівнюється з напругою u_3 на виході компенсувального вимірювального трансформатора напруги (КВТН). Операційний підсилювач змінює напругу на первинній обмотці КВТН таким чином, що напруга на його вході стає рівною нулю. Якщо КВТН розрахувати так, що його похибки при будь-якому значенні u_1 рівні похибкам ВВТН, то в цьому випадку напруга u_4 на виході пристрою буде пропорційна вимірюваній напрузі u_1

$$u_4 = k u_1, \quad (1)$$

де $k = \frac{W_2 W_4}{W_1 W_3} n$, де W_2, W_3 – число витків вторинних обмоток ВВТН та КВТН відповідно, W_1, W_4 – число витків первинних обмоток ВВТН та КВТН відповідно.

Для визначення умов, при яких буде здійснюватись компенсація, на підставі II закону Кірхгофа, закону електромагнітної індукції та скориставшись математичною моделлю процесів в феромагнітному осерді, що запропонована Безсоновим Л.А., складемо диференційні рівняння для ВВТН та КВТН відповідно (індуктивністю розсіювання обмоток зневажаємо):

$$W_1 S_1 \left(1 + \eta \frac{r_1 W_2^2}{R_n W_1^2}\right) \frac{dB_1}{dt} = u_1 - \frac{r_1 l_1}{W_1} [f_{\text{непар}}(B_1) + \frac{1}{\omega} \varphi_{\text{пар}}(B_1) \frac{dB_1}{dt}], \quad (2)$$

$$W_4 S_2 \frac{dB_2}{dt} = u_4 - \frac{r_4 l_2}{W_4} [f_{\text{непар}}(B_2) + \frac{1}{\omega} \varphi_{\text{пар}}(B_2) \frac{dB_2}{dt}], \quad (3)$$

де $\eta = \frac{R_n}{r_2 + R_n}$, r_2 – активний опір обмотки W_2 , R_n – опір навантаження ВВТН;

$f_{\text{непар}}(B)$ – непарна функція від індукції B ; $f_{\text{пар}}(B)$ – парна функція від індукції B ; r_1, r_4 – активні опори обмоток W_1 та W_4 відповідно; l_1, l_2 – середні довжини ліній магнітних полів в осердях ВВТН та КВТН відповідно; S_1, S_2 – поперечні перерізи осердь ВВТН та КВТН відповідно; B_1, B_2 – індукції в осердях ВВТН та КВТН відповідно; ω – кутова частота.

Вирішення диференційних рівнянь (2) та (3) за допомогою методу малого параметру, розкладання $f_{\text{пар}}(B)$ і $f_{\text{непар}}(B)$ в ряд Тейлора та вираження парних і непарних ступенів $\cos \omega t$ і $\sin \omega t$ через кратні кути дає можливість отримати вирази для визначення першої гармоніки напруг u_2 та u_3 відповідно:

$$u_2 \cong \omega \eta W_2 S_1 B_{1m} \left(1 - \frac{r_1 l_1}{\omega W_1^2 S_1 \left(1 + \eta \frac{r_1 W_2^2}{R_n W_1^2}\right)} \beta_{21}(B_{1m})\right) \sin(\omega t + \frac{r_1 l_1}{\omega W_1^2 S_1 \left(1 + \eta \frac{r_1 W_2^2}{R_n W_1^2}\right)} \beta_{11}(B_{1m})),$$

$$u_3 \cong \omega W_3 S_2 B_{2m} \left(1 - \frac{r_4 l_2}{\omega W_4^2 S_2} \beta_{22}(B_{2m})\right) \sin(\omega t + \frac{r_4 l_2}{\omega W_4^2 S_2} \beta_{12}(B_{2m})),$$

де $\beta_{22}(B_{2m})$, $\beta_{12}(B_{2m})$, $\beta_{21}(B_{1m})$, $\beta_{11}(B_{1m})$, – функції, що залежать від властивостей феромагнітного осердя.

З урахуванням того, що напруга на вході ОП практично дорівнює нулю, по другому закону Кірхгофа запишемо

$$U_{4m} = \frac{n U_{1m} W_2 W_4}{W_1 W_3} \left[\frac{\eta(1 + \delta_{\text{ВВТН}}) \sin(\omega t + \Delta\varphi_{\text{ВВТН}})}{(1 + \delta_{\text{КВТН}}) \sin(\omega t + \Delta\varphi_{\text{КВТН}})} \right], \quad (4)$$

де $\Delta\varphi_{\text{ВВТН}}$ – фазова похибка ВВТН, $\Delta\varphi_{\text{ВВТН}} = \frac{r_1 l_1}{\omega W_1^2 S_1 (1 + \eta \frac{r_1 W_2^2}{R_u W_1^2})} \beta_{11}(B_{1m})$,

$\Delta\varphi_{\text{КВТН}}$ – фазова похибка КВТН, $\Delta\varphi_{\text{КВТН}} = \frac{r_4 l_2}{\omega W_4^2 S_2} \beta_{12}(B_{2m})$, $n = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$,

$\delta_{\text{ВВТН}}$ – відносна амплітудна похибка ВВТН,

$$\delta_{\text{ВВТН}} = - \frac{r_1 l_1}{\omega W_1^2 S_1 (1 + \eta \frac{r_1 W_2^2}{R_u W_1^2})} \beta_{21}(B_{1m}),$$

$\delta_{\text{КВТН}}$ – відносна амплітудна похибка КВТН, $\delta_{\text{КВТН}} = - \frac{r_4 l_2}{\omega W_4^2 S_2} \beta_{22}(B_{2m})$.

З виразу (4) виходить, що напруга на виході пристрою буде пропорційна вимірюваній напрузі у разі однаковості похибок ВВТН та КВТН.

Цілком природно визначити при цьому можливість такого вибору КВТН, щоб він був значно менший за розмірами, чим ВВТН. Для визначення оптимальних параметрів КВТН відзначимо, що всі параметри ВВТН відомі. Матеріал осердя КВТН вважатимемо ідентичним матеріалу осердя ВВТН.

Після того, як були записані вирази для визначення фазової та амплітудної похибок для ВВТН та КВТН і прирівняні між собою, були отримані умови, при яких вихідна напруга пропорційна вимірюваній:

$$W_4 = \frac{U_{m4} W_1 S_1}{U_{m1} S_2}, \quad (5)$$

$$\frac{l_1 l_{m1}}{k_{m1} Q_{o1} S_1} = \frac{l_2 l_{m2}}{k_{m2} Q_{o2} S_2}, \quad (6)$$

де l_{m1}, l_{m2} – середні довжини витків обмоток W_1 та W_4 відповідно; $Q_{o1}, Q_{o2}, K_{m1}, K_{m2}$ – площини вікон осердь, коефіцієнти заповнення міддю вікон осердь ВВТН та КВТН відповідно.

Розрахунки КВТН для компенсації похибок ВВТН, які випускаються промисловістю, показали, що умови компенсації виконуються при значно менших габаритних розмірах, чому сприяє низький коефіцієнт заповнення вікна міддю ВВТН. Для деяких ВВТН параметри КВТН такі, що первинний струм приблизно дорівнює десятку частку ампера. В такому разі схема може бути трішки змінена (рис. 4).

В даному випадку напруга з дільника на резисторі R_2 порівнюється з напругою u_3 на виході КВТН. Операційний підсилювач коректує напругу на первинній обмотці W_4 КВТН таким чином, що напруга на його вході стає рівною нулю. Підключення одного кінця обмотки W_4 до виводу вторинної обмотки ВВТН, дозволяє збільшити число витків цієї обмотки і, отже, зменшити струм. Для вимірювання напруги на обмотці W_4 , обидва кінці обмотки підключаються до віднімальника. Умови, при яких напруга на виході пристрою буде пропорційна вимірюваній напрузі, залишаються такі самі.

Висока точність може бути забезпечена при роботі ВВТН на холостому ході і при постійному навантаженні. При зміні опору навантаження має місце похибка від падіння напруги від струму навантаження на активних опорах обмоток. Такий вплив можна скомпенсувати падінням напруги на додатковому резисторі, який буде встановлено у вторинній обмотці ВВТН, у випадку однофазного виконання трансформатора або падінням напруги на резисторі, на який навантажено додатковий трансформатор струму послідовно включений у вторинну обмотку ВВТН, у разі трьохфазного виконання трансформатора.

Таким чином, ВВТН може одночасно жити пристрої захисту і вимірювання, які не потребують високої точності, а пристрій дозволяє формувати напругу однозначно пов'язану з вимірюваною напругою по формі, що дозволяє точно здійснювати цілий ряд важливих сьогодні вимірювань, наприклад, визначення показників якості електроенергії.

У другому розділі також удосконалено метод електронної компенсації похибки вимірювального трансформатора струму, що придатний для високовольтного вимірювального трансформатора струму (ВВТС), на підставі якого розроблено схему пристрою електронної компенсації похибки ВВТС (рис. 5).

Компенсація похибки ВВТС може бути здійснена завдяки корекції результатів перетворення за допомогою компенсуючого вимірювального трансформатора струму (КВТС), який буде створювати струм, пов'язаний з струмом намагнічування, а, отже, і з похибкою ВВТС.

Принцип роботи пристрою полягає в наступному.

Різниця напруг вторинної обмотки ВВТС W_2 і вторинної обмотки КВТС W_3 підключена до входу ОП таким чином, що вихід ОП створює таке значення струму i_3 в обмотці W_4 , що напруга на вході ОП дорівнює нулю. При виборі

параметрів КВТС такими, що індукції в осердях КВТС і ВВТС однакові, напруженості їх магнітних полей теж однакові, а оскільки струм є тільки в обмотці W_4 , приєднаної до ОП, то згідно з закону повного струму для КВТС, струм i_3 визначається із співвідношення

$$i_3 = \frac{H_2 l_2}{W_4} = \frac{H_1 l_2}{W_4} = \frac{H_1 l_2 l_1 W_1}{W_4 l_1 W_1} = \frac{l_2 W_1}{l_1 W_4} i_\mu,$$

де H_1, H_2 – напруженості магнітних полей в осердях ВВТС та КВТС відповідно; l_1, l_2 – середні довжини ліній магнітних полей в осердях ВВТС та КВТС відповідно; W_1, W_4 – число витків первинних обмоток ВВТС та КВТС

відповідно; i_μ – струм намагнічування ВВТС, $i_\mu = \frac{H_1 l_1}{W_1}$.

Таким чином, i_3 пропорційний струму намагнічування ВВТС.

Для визначення умов, при яких буде здійснюватись компенсація, на підставі закону повного струму, закону Ома та скориставшись математичною моделлю процесів в феромагнітному осерді, що запропонована Безсоновим Л.А., складемо диференційні рівняння для ВВТС та КВТС відповідно (при умові, що осердя ТС не перемагнічується і індуктивністю розсіювання обмоток зневажили):

$$\frac{dB_1}{dt} = \frac{W_1 R_H}{W_2^2 S_1} I_{1m} \sin \omega t - \frac{l_1 R_H}{W_2^2 S_1} \{f_{\text{непар}}(B_1) + \frac{1}{\omega} \varphi_{\text{пар}}(B_1) \frac{dB_1}{dt}\}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dB_2}{dt} = & \frac{W_1 I_{1m}}{W_2} \frac{R_H K_{\text{під}} (r_4 + r_5)}{(r_4 + r_5)(W_4 S_2 + W_3 S_2 K_{\text{під}})} \sin \omega t - \\ & - \frac{l_1}{W_2} \frac{R_H K_{\text{під}} (r_4 + r_5)}{(r_4 + r_5)(W_4 S_2 + W_3 S_2 K_{\text{під}})} \{f_{\text{непар}}(B_1) + \frac{1}{\omega} \varphi_{\text{пар}}(B_1) \frac{dB_1}{dt}\} - \\ & - \frac{l_2 (r_4 + r_5)}{W_4 (W_4 S_2 + W_3 S_2 K_{\text{під}})} \{f_{\text{непар}}(B_2) + \frac{1}{\omega} \varphi_{\text{пар}}(B_2) \frac{dB_2}{dt}\}, \end{aligned} \quad (8)$$

де B_1, B_2 – індукції в осердях ВВТС та КВТС відповідно; W_2, W_3 – число витків вторинних обмоток ВВТС та КВТС відповідно; S_1, S_2 – поперечні перерізи осердь ВВТС та КВТС відповідно; $K_{\text{під}}$ – коефіцієнт підсилення ОП; r_4, r_5 – активні опори обмоток W_4 та W_5 .

Вирішення диференційних рівнянь (7) та (8) за допомогою методу малого параметру, розкладання $f_{\text{пар}}(B)$ і $f_{\text{непар}}(B)$ в ряд Тейлора та вираження парних і непарних ступенів $\cos \omega t$ і $\sin \omega t$ через кратні кути дає можливість отримати вирази для визначення першої гармоніки струму i_2 та i_3 :

$$i_2 \cong \frac{\omega W_2 S_1 B_{1m}}{R_H + r_2} \left[\left(1 - \frac{(R_H + r_2) l_1}{W_2^2 S_1 \omega} \beta_{11}(B_{1m})\right) \sin \omega t + \frac{(R_H + r_2) l_1}{W_2^2 S_1 \omega} \beta_{21}(B_{1m}) \cos \omega t \right], \quad (9)$$

$$i_3 \cong i_2 \frac{R_H K_{nid}}{r_4 + r_5} + [B_{2m} \omega \sin \omega t - \frac{l_1}{W_2} \frac{B_{2m} R_H K_{nid}}{(W_4 S_2 + W_3 S_2 K_{nid})} \times$$

$$\times \{\beta_{11}(B_{2m}) \sin \omega t - \beta_{21}(B_{2m}) \cos \omega t\} - \frac{B_{2m} l_2 (r_4 + r_5)}{W_4 (W_4 S_2 + W_3 S_2 K_{nid})} \times \quad (10)$$

$$\times \{\beta_{12}(B_{2m}) \sin \omega t - \beta_{22}(B_{2m}) \cos \omega t\}] \frac{(-W_4 S_2 - W_3 S_2 K_{nid})}{r_4 + r_5}.$$

Перша гармоніка струму i_4 згідно з закону повного струму $i_4 W_7 = i_3 W_5 + i_2 W_6$, враховуючи рівняння (9) та (10) визначається як

$$i_4 = \frac{W_1 I_{1m} W_6}{W_2 W_7} \left[\left(1 - \frac{(R_H + r_2) l_1}{W_2^2 S_1 \omega} \beta_{21}(B_{1m})\right) + \frac{W_5 l_2 (R_H + r_2)}{W_4 \omega W_6 W_3 S_2} \beta_{22}(B_{2m}) \right] \times \quad (11)$$

$$\times \sin(\omega t + \left[\frac{(R_H + r_2) l_1}{\omega W_2^2 S_1} \beta_{11}(B_{1m}) - \frac{(R_H + r_2) W_5 l_2}{\omega W_6 W_4 W_3 S_2} \beta_{12}(B_{2m}) \right]).$$

Для того, щоб струм i_4 був пропорційний струму i_1 згідно з виразу (11) необхідно, щоб матеріали осердь були однакові, тоді $\beta_{11} = \beta_{12}$ та $\beta_{21} = \beta_{22}$ і виконувались наступні умови:

$$W_2 S_1 = W_3 S_2,$$

$$\frac{l_2 W_5}{W_4} = \frac{l_1 W_6}{W_2}.$$

Розрахунки КВТС для компенсації похибок ВВТС, які випускаються промисловістю, показали, що умови компенсації виконуються при значно менших габаритних розмірах КВТС.

Висока точність перетворення може бути забезпечена у випадку, коли співвідношення $\frac{r_2}{R_H} \rightarrow 0$. У протилежному випадку має місце похибка від падіння напруги на опорі вторинної обмотки ВВТС. Такий вплив можна усунути, якщо обмотку W_3 підключити до додаткової вторинної обмотки ВВТС, що працює на холостому ході.

Таким чином, використання запропонованого пристрою дозволяє компенсувати струм намагнічування ВВТС і отримати напругу однозначно пов'язану по формі з вимірюваним струмом, що робить можливим здійснювати цілий ряд важливих сьогодні вимірювань. Усі навантаження, які не потребують

високої точності вимірювання живляться як звичайно і пропонуваній пристрій не знижує надійності перетворення для цих навантажень.

Використання запропонованого пристрою дає можливість додавати струм i_3 через додаткову обмотку не тільки для одного ТС, а й для декілька за допомогою таких самих додаткових обмоток, з'єднаних послідовно одна з одною.

У **третьому розділі** було досліджено похибки компенсованих трансформаторів при використанні запропонованих пристроїв, а саме вплив розходження характеристик феромагнітних матеріалів ВВТН і КВТН та ВВТС і КВТС на точність перетворення напруги та струму відповідно.

Відносна амплітудна та фазова похибки компенсованого трансформатора напруги відповідно дорівнюють:

$$\delta_u \cong \frac{r_1 l_1}{\omega W_1^2 S_1} \left(\frac{H_{cКВТН} - H_{cВВТН}}{B_{1m}} \right),$$

$$\Delta\varphi_u \cong \frac{r_1 l_1}{\omega W_1^2 S_1} \left(1 - \frac{\mu_{ВВТН}}{\mu_{КВТН}} \right) \beta_{11}(B_{1m}),$$

де $H_{cВВТН}$, $H_{cКВТН}$ – коерцитивні сили в осердях ВВТН та КВТН відповідно; $\mu_{ВВТН}$, $\mu_{КВТН}$ – магнітні проникливості осердь ВВТН та КВТН відповідно.

Відносна амплітудна та фазова похибки компенсованого трансформатора струму відповідно дорівнюють:

$$\delta_i \cong \frac{(R_u + r_2) l_1}{\omega W_2^2 S_1} \left(\frac{H_{cКВТС} - H_{cВВТС}}{B_{1m}} \right),$$

$$\Delta\varphi_i \cong \frac{(R_u + r_2) l_1}{\omega W_2^2 S_1} \left(1 - \frac{\mu_{ВВТС}}{\mu_{КВТС}} \right) \beta_{11}(B_{1m}),$$

де $H_{cВВТС}$, $H_{cКВТС}$ – коерцитивні сили в осердях ВВТС та КВТС відповідно; $\mu_{ВВТС}$, $\mu_{КВТС}$ – магнітні проникливості осердь ВВТС та КВТС відповідно.

З виразів для визначення похибок компенсованих трансформаторів напруги та струму виходить, що змінення коерцитивної сили в одному з осердь значним чином впливає на відносну амплітудну похибку, змінення магнітної проникливості в одному з осердь – на фазову похибку.

На підставі отриманих виразів було досліджено вплив температури на похибку компенсованих трансформаторів. Унаслідок знаходження високовольтних вимірювальних трансформаторів та компенсувальних пристроїв в різних температурних умовах додаткова відносна амплітудна похибка компенсованих трансформаторів може скласти приблизно $\pm 1,25\%$ від похибки високовольтних вимірювальних трансформаторів при відхиленні

температури на кожні десять градусів від нормальної, а фазова похибка практично не зазнає змін.

Досліджено похибки схем трансформаторів струму з електронною компенсацією похибки, де осердя практично не перемагнічується, з урахуванням сімейства петель гістерезіса, зокрема схема з введенням негативного опору у вторинній обмотці та схема з компенсацією падіння напруги у вторинній обмотці. У якості ТС в пристрої електронної компенсації похибки ВВТС доцільно використовувати схему з компенсацією падіння напруги у вторинній обмотці.

В даному розділі також були визначені похибки вимірювання активної потужності та електроенергії, які є найбільш важливими параметрами режиму, що сьогодні визначаються похибками ВВТН і ВВТС. Приведена похибка вимірювання активної потужності має наступний вигляд (при умові ідеальності інших елементів)

$$\gamma_P = \frac{I'_1}{I'_{1\text{НОМ}}} \frac{U'_1}{U'_{1\text{НОМ}}} [(1 + \delta_{\text{ВВТС}} + \delta_{\text{ВВТН}} + \delta_{\text{ВВТС}} \delta_{\text{ВВТН}}) \{\cos(\varphi + \Delta\varphi_{\text{ВВТС}} - \Delta\varphi_{\text{ВВТН}}) - \cos\varphi\}], \quad (13)$$

де I'_1, U'_1 – дійсні діючі значення вимірюваного струму та напруги, що приведені до вторинних обмоток ВВТС та ВВТН відповідно; $I'_{1\text{НОМ}}, U'_{1\text{НОМ}}$ – номінальні дійсні діючі значення вимірюваного струму та напруги, що приведені до вторинних обмоток ВВТС та ВВТН відповідно; φ – кут між вимірюваним струмом та напругою.

Відносна похибка вимірювання електроенергії визначається як (при умові ідеальності інших елементів)

$$\delta_w = \frac{(1 + \delta_{\text{ВВТС}} + \delta_{\text{ВВТН}} + \delta_{\text{ВВТС}} \delta_{\text{ВВТН}}) \cos(\varphi + \Delta\varphi_{\text{ВВТС}} - \Delta\varphi_{\text{ВВТН}}) - 1}{\cos\varphi}. \quad (14)$$

Так, наприклад, при роботі вимірювальних трансформаторів струму та напруги в класі точності 0.5, приведена похибка вимірювання активної потужності може досягати 1,4% при $1,2U_{1\text{НОМ}}, 1,2I_{1\text{НОМ}}$ та $\cos\varphi=1$, відносна похибка вимірювання електроенергії – 2% при $0,05I_{1\text{НОМ}}, 1,2U_{1\text{НОМ}}$ та $\cos\varphi=1$.

На підставі отриманого виразу для визначення похибки вимірювання електроенергії було розраховано недооблік електроенергії по приєднанню «Суми – Суджа 110 кВ» підстанції «Суми – 330 кВ» Північної електроенергетичної системи НЕК «Укренерго» з урахуванням похибок трансформаторів та при умові зменшення їх на порядок унаслідок використання компенсуювальних пристроїв. Розрахунки показали, що при роботі вимірювальних трансформаторів приблизно в класі 0.5 недооблік електроенергії в грошовому еквіваленті в середньому в рік може складати 1 млн. гривень, а у разі компенсації – 100000 грн.

В четвертому розділі дисертації наведено алгоритми розрахунку параметрів елементів запропонованих пристроїв, що містять визначення числа

витків обмоток, їх поперечного перерізу та типорозмірів осердь компенсувальних вимірювальних трансформаторів. По наведеним алгоритмам проведено розрахунок параметрів елементів пристроїв для високовольтних вимірювальних трансформаторів, що експлуатуються. Наприклад, для повної компенсації похибок таких трансформаторів напруги, як НОМ – 6, 10, 20, 35, типорозмір осердя КВТН може бути Ш-25, а типорозмір осердя ВТС для таких трансформаторів струму, як ТФЗМ – 35У1, ТФН – 110 може бути ОЛ28. Достовірність запропонованих компенсацій було перевірено на експериментальних макетах кафедри автоматизації енергосистем НТУ «ХП». Фазова похибка ВТН експериментального макету при номінальній первинній напрузі 220 В до компенсації склала $0,25^\circ$, похибка компенсованого трансформатора напруги склала $0,02^\circ$. Фазова похибка ВТС при номінальним первиннім струмі 5 А до компенсації склала $0,42^\circ$, похибка компенсованого трансформатора струму склала – $0,04^\circ$. На макеті трансформатора, який використовується в пристрої компенсації реактивної потужності, що виготовляється фірмою «Електросфера», були підтверджені отримані результати.

В даному розділі були розглянуті питання метрологічного випробування запропонованих пристроїв і було визначено необхідність створення перевірочних установ на великі струми та напруги високої точності.

Запропоновані в даній дисертаційній роботі пристрої електронної компенсації похибок ВВТС та ВВТН можуть бути вмонтовані в вимірювальний пристрій. Це не потребує ніяких змін в стандартах, але призводить до деяких труднощів при випробуванні вимірювального пристрою, а саме до необхідності узгодження його роботи з високовольтним вимірювальним трансформатором.

Запропоновані пристрої можуть бути також виготовлені як окремі пристрої, які додаються до високовольтних трансформаторів. В цьому випадку треба змінювати стандарти на вихід високовольтних вимірювальних трансформаторів, а саме к існуючим стандартам додати вихід в межах $5\div 10$ В, що призводить до необхідності в зміні великої кількості нормативних документів.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача розробки компенсувальних пристроїв, приєднання яких до вторинних кіл високовольтних вимірювальних трансформаторів струму та напруги дозволяє зменшити похибки, що ними обумовлені, та підвищити точність перетворення струму та напруги.

Основні результати, які отримані в роботі:

1. Розроблена класифікація існуючих способів зменшення похибок вимірювальних трансформаторів струму та напруги. Класифіковані схеми трансформаторів струму та напруги з електронною компенсацією похибки.

2. Удосконалено метод електронної компенсації похибки вимірювального трансформатора струму, що придатний для високовольтного трансформатора, і згідно з яким струм намагнічування ВВТС, а, отже, і його похибка компенсується завдяки корекції результатів перетворення для відокремленої частини навантаження високовольтного трансформатора. Такий метод не вимагає створення операційним підсилювачем усієї потужності навантаження та змінення в стандартній конструкції ВВТС. На підставі удосконаленого методу розроблено схему пристрою електронної компенсації похибки ВВТС.

3. Удосконалено метод електронної компенсації похибки вимірювального трансформатора напруги, що придатний для високовольтного трансформатора, і згідно з яким вторинна напруга ВВТН порівнюється з вторинною напругою КВТН. Якщо похибки цих трансформаторів однакові, напруга на первинній обмотці КВТН буде пропорційна вимірюваній напрузі. Такий метод компенсації не вимагає змінення стандартної конструкції ВВТН та створення операційним підсилювачем усієї потужності навантаження. На підставі удосконаленого методу розроблено схему пристрою електронної компенсації похибки ВВТН.

4. Проаналізована робота пристроїв електронної компенсації похибок ВВТС та ВВТН. Обґрунтовані співвідношення параметрів компенсувальних пристроїв, при яких досягається повна компенсація похибок високовольтних вимірювальних трансформаторів струму та напруги. В ході експерименту було встановлено, що фазова похибка, яка обумовлена ВТН, зменшується з $0,25^\circ$ до $0,02^\circ$ а фазова похибка, яка обумовлена ВТС, зменшується з $0,42^\circ$ до $-0,04^\circ$.

5. Отримано залежності фазової та відносної амплітудної похибок компенсованих трансформаторів від зміни параметрів петель гістерезиса, що може мати місце під час експлуатації. На підставі отриманих залежностей було визначено, що унаслідок знаходження високовольтних трансформаторів і компенсувальних пристроїв в різних температурних умовах, додаткова відносна амплітудна похибка компенсованих трансформаторів може скласти $\pm 1,25\%$ від похибки трансформатора без компенсації при відхиленні температури на кожні десять градусів від нормальної, а фазова похибка практично не зазнає змін.

6. Розроблено алгоритми розрахунку параметрів елементів пристроїв електронної компенсації похибок ВВТС та ВВТН, що дозволяє розрахувати конструктивні параметри пристроїв для конкретних високовольтних вимірювальних трансформаторів, які випускаються промисловістю. На підставі розроблених алгоритмів було визначено, що типорозмір осердя КВТН може бути Ш-25 у разі повної компенсації похибок трансформаторів типу НОМ-6, 10, 20, 35, а типорозмір осердя КВТС може бути ОЛ-28 у разі повної компенсації трансформаторів типу ТФЗМ – 35У1, ТФН – 110.

7. Виготовлення пристроїв компенсації можливо як у складі вимірювального засобу, так і у вигляді окремих пристроїв, які додаються до високовольтних вимірювальних трансформаторів, що потребує зміни в нормативних документах. Проведення метрологічних випробувань

запропонованих пристроїв потребує створення перевірочних установ на великі струми та напруги високої точності.

8. Використання пристроїв компенсації похибки ВВТС та ВВТН значно підвищить точність вимірювання струму та напруги в електроенергетичних системах, особливо це актуально при вимірюванні активної потужності та електроенергії. Наприклад, приведена похибка вимірювання активної потужності може досягати 1,4 %, а відносна похибка вимірювання електроенергії 2% у разі роботи ВВТС та ВВТН в класі точності 0.5 при ідеальних інших елементах та $\cos\varphi=1$.

9. Для впровадження запропонованих пристроїв на об'єктах електроенергетичних систем, необхідно включити в стандарти на трансформатори струму та напруги додаткові виходи по напрузі в межах $(5\div 10)$ В.

10. Результати роботи впроваджені в розробці пристрою компенсації реактивної потужності, що виготовляється фірмою «Електросфера», а також в навчальному процесі кафедри автоматизації енергосистем НТУ «ХПІ».

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Рудевич Н. В. Повышение точности измерительных трансформаторов напряжения / Н. В. Рудевич // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків, 2005. – №36. – С. 99–102.

2. Рудевич Н. В. Способи підвищення точності вимірювальних трансформаторів струму / В. У. Кизилов, Н. В. Рудевич // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків, 2007. – Том 1, випуск 57 – С. 37–41.

Здобувачем запропоновано класифікацію схем вимірювальних трансформаторів струму з електронною компенсацією похибки.

3. Рудевич Н. В. Підвищення точності вимірювання струму / В. У. Кизилов, Н. В. Рудевич // Світлотехніка та електроенергетика. – Харків, 2008. – №1. – С. 66–69.

Здобувачем запропоновано схему пристрою електронної компенсації похибки ВВТС.

4. Рудевич Н. В. Підвищення точності вимірювання напруги / В. У. Кизилов, Н. В. Рудевич // Вісник Приазовського державного технічного університету «Енергетика». – Маріуполь, 2008. – Випуск 18, ч. 2. – С. 31–34.

Здобувачем запропоновано схеми пристроїв електронної компенсації похибок ВВТН з урахуванням конструктивних особливостей трансформаторів.

5. Рудевич Н. В. Вплив зміни температури на похибку компенсації високовольтного вимірювального трансформатора напруги / Н. В. Рудевич // Вісник Харківського національного технічного університету сільського

господарства імені Петра Василенко «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків, 2008. – Том 1, випуск 73– С. 32–35.

6. Рудевич Н. В. О влиянии параметров высоковольтного измерительного трансформатора тока на точность устройства компенсации его погрешности / Н.В. Рудевич // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. – Днепропетровск, 2008. – №12. – С. 53–58.

7. Пат. 81842 Україна, МПК⁶ G 01 R 19/00, H 01 F 27/42. Пристрій для електронної компенсації похибки вимірювальних трансформаторів напруги / Кизилів В. У., Рудевич Н. В.; заявник та патентовласник Кизилів В. У. – № а 2006 03919 ; заявл. 10.04.2006 ; опубл. 11.02.2008, Бюл. №3.

Здобувачем запропоновано схему пристрою електронної компенсації похибки ВВТН та визначено умови компенсації.

8. Пат. 84069 Україна, МПК⁶ G 01 R 19/00, H 01 F 19/00. Пристрій для вимірювання струму / Кизилів В. У., Рудевич Н. В.; заявник та патентовласник Кизилів В. У. – № а 2006 12841 ; заявл. 05.12.2006 ; опубл. 10.09.2008, Бюл. №17.

Здобувачем запропоновано схему пристрою електронної компенсації похибки ВВТС та визначено умови компенсації.

9. Пат. 85784 Україна, МПК⁶ G 01 R 19/00, H 01 F 27/42. Пристрій підвищення точності вимірювальних трансформаторів напруги / Кизилів В. У., Рудевич Н. В.; заявник та патентовласник Кизилів В. У. – № а 2007 09991 ; заявл. 06.09.2007 ; опубл. 25.02.2009, Бюл. №4.

Здобувачем запропоновано схему пристрою електронної компенсації похибки ВВТН.

АНОТАЦІЇ

Рудевич Н.В. Зменшення похибок, обумовлених високовольтними трансформаторами струму та напруги, приєднанням до їхніх вторинних кіл компенсувальних пристроїв. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2009.

Дисертація присвячена розробці компенсувальних пристроїв, використання яких дозволяє зменшити похибки, обумовлені високовольтними вимірювальними трансформаторами струму та напруги.

В роботі удосконалено метод електронної компенсації похибки вимірювального трансформатора струму, який придатний для ВВТС; удосконалено метод електронної компенсації похибки вимірювального трансформатора напруги, який придатний для ВВТН. На підставі удосконалених методів розроблено схеми пристроїв електронної компенсації похибок ВВТС та ВВТН, обґрунтовані співвідношення параметрів пристроїв, при яких буде досягатись повна компенсація похибок ВВТС та ВВТН,

розроблено алгоритми розрахунку параметрів елементів пристроїв, отримано залежності похибок компенсованих трансформаторів від зміни параметрів петель гістерезиса. Проведено експериментальні дослідження. Досліджено похибки схем трансформаторів струму з електронною компенсацією похибки, що можуть бути складовою частиною пристрою електронної компенсації похибки ВВТС. Визначені похибки вимірювання активної потужності та електроенергії, що обумовлені похибками ВВТС та ВВТН. Розглянуті питання метрологічного випробування запропонованих пристроїв.

Ключові слова: удосконалення наявного обладнання електроенергетичних об'єктів, високовольтний вимірювальний трансформатор струму, високовольтний вимірювальний трансформатор напруги, компенсувальні пристрої.

Рудевич Н.В. Уменьшение погрешностей, обусловленных высоковольтными трансформаторами тока и напряжения, присоединением к их вторичным цепям компенсирующих устройств. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 - электрические станции, сети и системы. Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2009.

Диссертация посвящена разработке компенсирующих устройств, что позволяет снизить погрешности, обусловленные высоковольтными измерительными трансформаторами тока (ВИТТ) и напряжения (ВИТН).

В работе разработана классификация существующих способов уменьшения погрешностей измерительных трансформаторов тока и напряжения, к которым относятся изменение конструктивных и технологических параметров, электронная компенсация погрешности, изменение нагрузки, программная коррекция. Классифицированы схемы измерительных трансформаторов тока с электронной компенсацией погрешности по принципу действия, а именно, где сердечник не перемагничивается, и, где два сердечника перемагничиваются с одинаковой скоростью. Классифицированы схемы измерительных трансформаторов напряжения с электронной компенсацией погрешности по принципу действия: дифференциальные схемы и схемы, где компенсация падения напряжения осуществляется в первичной и вторичной обмотках отдельно. На основании сравнительного анализа показано, что электронная компенсация погрешности является самым эффективным и не затратным способом.

В работе усовершенствован метод электронной компенсации погрешности измерительного трансформатора тока, который можно использовать для высоковольтного трансформатора. Усовершенствованный метод позволяет компенсировать ток намагничивания ВИТТ, а, следовательно, и его погрешность благодаря коррекции результатов преобразования. Также усовершенствован метод электронной компенсации погрешности измерительного трансформатора напряжения, который можно использовать для

высоковольтного трансформатора. Согласно усовершенствованному методу вторичное напряжение ВИТН сравнивается с вторичным напряжением компенсирующего измерительного трансформатора напряжения и если погрешности этих трансформаторов будут одинаковы, напряжение на первичной обмотке компенсирующего измерительного трансформатора напряжения будет пропорционально измеряемому напряжению. На основании усовершенствованных методов разработаны схемы устройств электронной компенсации погрешностей ВИТТ и ВИТН, которые не требуют изменения в стандартной конструкции высоковольтных трансформаторов и создание операционным усилителем всей мощности нагрузки. Высоковольтные измерительные трансформаторы, как обычно, питают устройства защиты и измерения, которые не требуют высокой точности, а предлагаемые устройства, не снижая надежности для основной нагрузки, формируют напряжение однозначно связанное с измеряемой величиной.

Проанализирована работа устройств и обоснованы соотношения параметров компенсирующих устройств, при которых достигается полная компенсация погрешностей высоковольтных измерительных трансформаторов тока и напряжения. Достоверность работы компенсирующих устройств проверена на экспериментальном макете.

Получены зависимости погрешностей компенсированных трансформаторов от изменения параметров петли гистерезиса. Изменение магнитной проницаемости сердечников главным образом сказывается на фазовой погрешности, изменение коэрцитивной силы – на амплитудной погрешности компенсированных трансформаторов. Исследовано влияние температуры на погрешности компенсированных трансформаторов. Необходимость в таком исследовании связано с тем, что высоковольтные трансформаторы и компенсирующие устройства в процессе эксплуатации могут находиться в разных температурных условиях, что может привести к дополнительной погрешности.

Определены погрешности схем трансформаторов тока с электронной компенсацией погрешности с учетом семейства петель гистерезиса, а именно схема с введением отрицательного сопротивления во вторичной обмотке и схема с компенсацией падения напряжения во вторичной обмотке. В качестве трансформатора тока в устройстве электронной компенсации погрешности ВИТТ целесообразно использовать схему с компенсацией падения напряжения во вторичной обмотке.

Исследованы погрешности измерения активной мощности и электроэнергии, которые обусловлены погрешностями ВИТТ и ВИТН. Рассчитан недоучет электроэнергии по присоединению «Сумы – Суджа 110 кВ» подстанции «Сумы – 330 кВ» Северной электроэнергетической системы НЭК «Укрэнерго» с учетом погрешностей высоковольтных измерительных трансформаторов и при условии их снижения на порядок вследствие использования компенсирующих устройств.

Разработаны алгоритмы расчета элементов устройств с учетом обоснованных соотношений, по которым рассчитаны параметры

компенсирующих устройств для эксплуатируемых в энергосистемах высоковольтных измерительных трансформаторов. Рассмотрены вопросы метрологического испытания предложенных устройств.

Ключевые слова: усовершенствование существующего оборудования электроэнергетических объектов, высоковольтный измерительный трансформатор тока, высоковольтный измерительный трансформатор напряжения, компенсирующие устройства.

Rudevich N.V. Reduction of the errors caused by high-voltage transformers of a current and voltage, joining to their secondary chains of compensating devices. – the Manuscript.

The dissertation is presented for Ph.D. degree receiving in the specialty 05.14.02 - power plants, networks and systems. National technical university "Kharkov polytechnic institute", Kharkov, 2009.

The dissertation is devoted working out of the compensating devices which use allows to reduce the errors caused by high-voltage measuring transformers of a current (HVMTC) and voltage (HVMTV).

In work the method of electronic compensation of an error of the measuring transformer of the current, which suitable for HVMTC is improved; the method of electronic compensation of an error of the measuring transformer of the voltage, which suitable for HVMTV is improved. On the basis of advanced methods schemes of devices of electronic compensation of errors HVMTC and HVMTV, proved parities of parameters of devices at which full compensation of errors HVMTC and HVMTV will be reached are developed, algorithms of calculation of parameters of elements of devices, obtained dependences of errors of the compensated transformers on change of parameters of loops of a hysteresis are developed. Experimental researches have been spent. Errors of schemes of transformers of a current with electronic compensation of an error which can be a component of the device of electronic indemnification of error HVMTC are investigated. Errors of measurement of active capacity and the electric power, caused by errors HVMTC and HVMTV are investigated. The considered questions of metrological test of the offered devices.

Keywords: improvement of the existing equipment of electropower objects, high-voltage measuring transformers of a current, high-voltage measuring transformers of voltage, compensating devices.