

УДК 621.316

Танкевич С. Є.; Блінов І. В., *к.т.н.*; Самков О. В., *к.т.н.*

### ЦИФРОВА ОБРОБКА СИГНАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ КОРЕКЦІЇ ПОХИБКИ АДАПТИВНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА СТРУМУ В УСТАЛЕНИХ РЕЖИМАХ

Танкевич С. Є., Блінов І. В., Самков О. В. Цифрова обробка сигналів з використанням штучних нейронних мереж для корекції похибки адаптивного вимірювального перетворювача струму в усталених режимах. Наведено метод цифрової обробки вихідного сигналу адаптивного вимірювального перетворювача струму при вимірюванні фазних миттєвих значень струмів в усталених режимах роботи ЛЕП високої напруги. Такий метод, що базується на використанні штучних нейронних мереж, дозволяє забезпечити необхідну задану високу точність вимірювальних перетворювачів у всьому діапазоні вимірювань  $(0,01-1,2) \cdot I_{\text{ном}}$ .

**Ключові слова:** НЕЙРОННА МЕРЕЖА, ЦИФРОВА ОБРОБКА СИГНАЛІВ, ЛЕП, ВИМІРЮВАННЯ, ПЕРЕТВОРЮВАЧ СТРУМУ

Танкевич С. Е., Блинов И. В., Самков А. В. Цифровая обработка сигналов с использованием искусственных нейронных сетей для коррекции погрешности адаптивного измерительного преобразователя тока в установившемся режиме. Приведен метод цифровой обработки вторичного сигнала адаптивного измерительного преобразователя тока при измерении фазных мгновенных значений токов в установившихся режимах работы ЛЭП высокого напряжения. Такой метод, основывающийся на использовании искусственных нейронных сетей, позволяет обеспечить необходимую заданную высокую точность измерительных преобразователей во всем диапазоне измерений  $(0,01-1,2) \cdot I_{\text{ном}}$ .

**Ключевые слова:** НЕЙРОННАЯ СЕТЬ, ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ЛЭП, ИЗМЕРЕНИЯ, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТОКА

Tankevych S. E., Blinov I. V., Samkov O. V. Digital signal processing using artificial neural networks for error correction of adaptive converter in steady state. The method is presented for secondary signal processing of an adaptive test converter during measurement of phase instant current values in steady state modes of electric power lines operation. It is based on application of artificial neural networks and allows to provide required given high accuracy of test converters over the whole measurement range  $(0,01-1,2) \cdot I_{\text{rated}}$ .

**Key words:** NEURAL NETWORK, DIGITAL SIGNAL PROCESSING, ELECTRIC POWER LINE, MEASUREMENTS, TEST CONVERTER

**Постановка задачі.** Міжнародні стандарти [1...3] ставлять досить жорсткі вимоги до давачів вимірювальної інформації про струм та напругу електроенергетичних об'єктів (ЕЕО), в тому числі, і до високовольтних вимірювальних трансформаторів. Вирішити ці питання неможливо без інтелектуалізації таких пристроїв шляхом використання сучасних цифрових технологій. Прикладом такого пристрою є адаптивний вимірювальний перетворювач струму (АВПС) [4], схема якого наведена на рис. 1 і який конструктивно включає електронний блок, що здійснює аналого-цифрове перетворення вимірюваного сигналу контрольованого ЕЕО та традиційні фазні трансформатори струму (ТС). Такий блок розташовується безпосередньо на приєднанні.

Конструктивні особливості АВПС дозволяють забезпечити його електромагнітну та інформаційну сумісність з цифровими системами автоматизованого керування технологічними процесами ЕЕО. Також до основних переваг АВПС слід віднести покращення його масо-габаритних характеристик та підвищення точності, що реалізується за рахунок використання методів цифрової обробки сигналів (ЦОС) для корекції його вихідного сигналу. Ці методи є більш надійними та точними в порівнянні з методами корекції з використанням аналогових засобів.

Загальне представлення виникнення похибки в системі вимірювання на основі використання АВПС в порівнянні з використанням аналогових вимірювальних трансформаторів наведено на рис. 2.

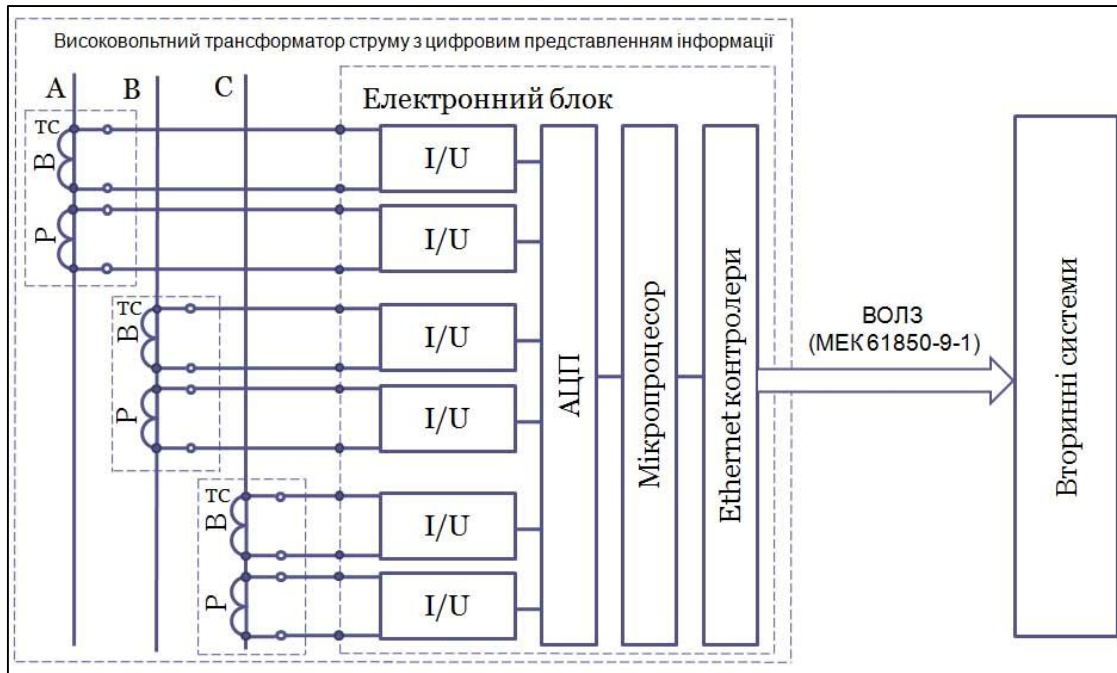


Рис. 1

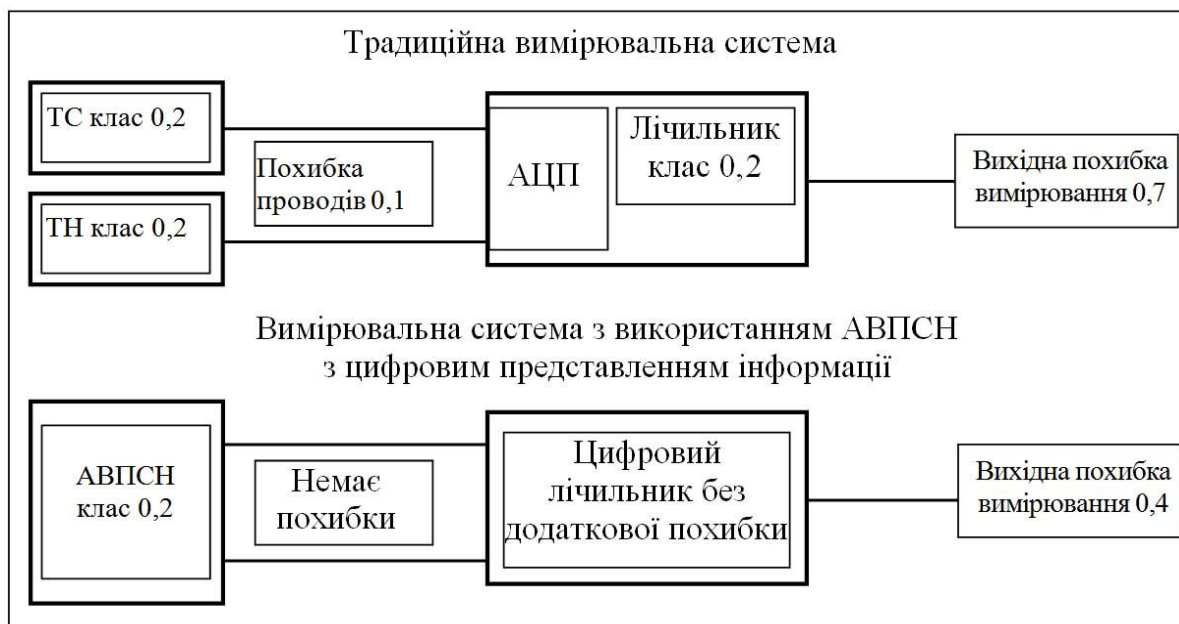


Рис. 2.

Процес ЦОС полягає в перетворенні вхідного цифрового сигналу в вихідний, в відповідності з закладеним алгоритмом. Треба мати на увазі, що така система повинна працювати в реальному часі процесу вимірювання. Таким чином, приймаючи до уваги, що відліки цифрового сигналу надходять з постійною заданою швидкістю, то обчислювальна частина АВПС має встигати обробляти сигнал, що поступає в період часу до приходу наступного.

Слід зазначити, що точність вимірювання інформації про стан та режими ЕЕО, зокрема і ліній електропередачі (ЛЕП) високої напруги, залежить, як від вибору методу вимірювання, так і від похибок давачів вимірювальної інформації. Точність сучасних електромагнітних ТС

має досить значні межі припустимих похибок вимірювання миттєвих значень струму. Наприклад, для вимірювальних виходів найбільш поширених ТС класу точності 0,5S, значення струмової похибки у відсотках складає:  $\pm 3,0$  при  $(0,01-0,05) \cdot I_{ном}$ ;  $\pm 1,5$  при  $0,2 \cdot I_{ном}$ ;  $\pm 0,5$  при  $(1,0-1,2) \cdot I_{ном}$ . Використання традиційних методів підвищення точності та надійності отримання вимірювальної інформації про стан та режими ЕЕО, в тому числі методів корекції похибок [5, 6] не дозволяє на даний час вирішити в повній мірі цю проблему. Все це дозволяє говорити про необхідність розробки та застосування нових нетрадиційних методів обробки результатів вимірювання, що дозволяють створювати системи, які працюють в темпі процесу.

Зважаючи на зазначене, метою статті є опис розробленого методу ЦОС для підвищення точності роботи АВПС при вимірюванні фазних миттєвих значень струмів ЛЕП високої напруги, шляхом корекції похибок вимірюваних сигналів в діапазоні теоретично можливих значень цих величин в усталених режимах роботи.

**Корекція похибки АВПС з використанням штучних нейронних мереж.** Зазначимо, що задача ЦОС при корекції похибок вимірювальних сигналів АВПС може бути сформульована як задача апроксимації функції. Суть цієї задачі полягає в перетворенні отриманої АВПС вимірювальної інформації про значення струмів в ЛЕП високої напруги в еталонні значення, що наближені до фактично очікуваних значень, і визначаються в умовах постійного надходження потоку такої інформації в темпі процесу вимірювання.

Сьогодні у світі спостерігається істотне підвищення інтересу до розв'язання багатьох електроенергетичних задач та задач цифрової обробки сигналів шляхом використання штучних нейронних мереж (ШНМ) [7-9].

Слід зазначити, що зважаючи на особливості розв'язання задачі корекції похибки АВПС як задачі ЦОС при вимірюванні миттєвих значень струму на ЛЕП високої напруги в усталеному режимі з використанням ШНМ, необхідним є врахування припустимих похибок для вимірювальних виходів сучасних електромагнітних ТС в діапазоні від 0,01 до  $1,2 I_{ном}$  та вимог до швидкості реалізації алгоритму такої корекції сигналу при визначенні та підготовці штучних нейронних мереж.

До процесу підготовки ШНМ з метою їх використання для корекції похибки АВПС висувається ряд основних вимог. По-перше, необхідно визначити типи нейронних мереж, які можуть бути ефективно використані для розв'язання поставленої задачі, а також провести обґрунтований вибір алгоритму навчання, функцій активації нейронів, попередньої архітектури, до якої належить кількість шарів та нейронів у кожному шарі мережі. По-друге, загальна сукупність (вибір) даних повинна бути розділена на навчальні та контрольні (тестові) вибірки даних, що в загальному випадку повинна містити значення миттєвих значень струму в ЛЕП. По-третє, слід провести навчання ШНМ з використанням попередньо створених адекватних вибірок даних, які у загальному випадку, мають містити як «еталонні» (очікувані), так і ретроспективні значення. Ці значення мають враховувати припустимі похибки сучасних електромагнітних ТС, мова йде про вимірювальні виходи. Далі необхідно провести оцінку точності навчання та роботи ШНМ, використовуючи, як контрольні, так і тестові вибірки даних. І, зрештою, слід перевірити ефективність застосування нейронної мережі для корекції похибки АВПС, використовуючи зафіксовані реальні значення тестової вибірки. У разі потреби, якщо точність не є задовільною, провести коригування вибірок даних або архітектури ШНМ та виконати повторне навчання.

Проведений аналіз показав, що існуюче різноманіття типів ШНМ дає змогу використати для розв'язання поставленої задачі певний стандартний тип. З огляду на особливості підготовки та використання ШНМ різного типу, а також на підставі експериментальних досліджень визначено, що найбільш доцільним є використання нейронних мереж на основі

радіально-базисних функцій (РБФ). Перевагою ШНМ радіально-базисного типу є спрощення процедури вибору оптимальної архітектури такої мережі (за рахунок наявності тільки одного скритого шару), а також її швидкість навчання та роботи, яка задовольняє вимогам до корекції похибок вимірювальних сигналів АВПС в темпі процесу вимірювання. Крім того, методи навчання такої нейронної мережі не створюють труднощів з локальними мінімумами, що підвищує, як ефективність навчання, так і ефективність її роботи, зокрема, при розв'язанні задач ЦОС.

Характерна властивість радіальної базисної функції нейронів прихованого шару ШНМ на основі РБФ полягає в тому, що її відгук монотонно спадає або зростає разом із віддаленням від центральної точки. Типовим прикладом такої функції є функція Гауса. При цьому, параметром, що суттєво впливає на якість навчання й роботи ШНМ радіально-базисного типу, є параметр згладжування активаційної функції нейронів ( $\delta$ ) прихованого шару. Вибір занадто малих значень  $\delta$  призводить до того, що така нейронна мережа втрачає здатність до узагальнення, а при занадто великих відхиленнях ШНМ радіально-базисного типу не буде враховувати особливості відліків миттєвих значень струму та напруги на ЛЕП високої напруги у тестовій вибірці. Існуючі рекомендації з вибору величини такого параметра є досить загальними, тому параметр  $\delta$  зазвичай вибирається дослідним шляхом. Так, при корекції похибки АВПС величина  $\delta$  може теоретично знаходитися в широких межах, наприклад, 0,001-10, хоча на практиці цей діапазон значно менший (0,01-0,1).

Метод корекції похибки АВПС, як задачі ЦОС при вимірюванні миттєвих значень струму на ЛЕП високої напруги в усталеному режимі з використанням ШНМ радіально-базисного типу дає можливість зменшити похибки вимірювальних виходів сучасних електромагнітних ТС в діапазоні від 0,01 до 1,2  $I_{ном}$ , які в цьому випадку, можуть сягати  $\pm 3\%$ .

На рис. 3 наведено блок-схему процесу підготовки ШНМ радіально-базисного типу для розв'язання поставленої задачі.

Слід зазначити, що підготовка адекватних вибірок даних для навчання ШНМ радіально-базисного типу полягає в використанні як «еталонних», так і ретроспективних миттєвих значень струму в одній фазі ЛЕП високої напруги. При цьому вхідна вибірка даних для навчання ШНМ буде містити ретроспективну виміряну інформацію, а вихідна вибірка даних буде містити очікувані (еталонні) значення струмів ЛЕП, які побудовано в умовах невизначеності форми можливої функціональної залежності між вхідними та вихідними даними.

Враховуючи це підготовка вибірки значень для навчання та роботи ШНМ радіально-базисного типу формувалася шляхом рівномірного розподілення та внесення похибки сучасних електромагнітних ТС в діапазоні від -3 до +3 % по всій вибірці очікуваної (еталонної) виміряної інформації про значення струму в одній фазі ЛЕП.

Також слід зазначити, що ефективність навчання ШНМ радіально-базисного типу залежить від щільності даних в навчальній вибірці та від кількості значень в ній. За умови відсутності формалізованих вимог до формування навчальної вибірки для навчання ШНМ радіально-базисного типу вибір дискретності та кількості значень необхідно проводити експериментальним шляхом. Виконані дослідження дозволили встановити, що достатньо щоб дискретизація даних у вибірках становила 20 значень на період, а кількість даних у загальній вибірці становила 2500. Необхідність проведення багаторазових експериментів призводить до того, що контрольна вибірка побічним чином приймає участь у навчанні ШНМ, що звичайно ослаблює її роль, як незалежного критерію якості підготовки такої мережі. Зважаючи на це, доцільним є використання тестової вибірки. При цьому, вочевидь, така вибірка має використовуватися лише один раз. Визначено, що навчальна вибірка

даних має складати 60%, а контрольна та тестова вибірки – по 20 % відповідно, від загальної вибірки даних.

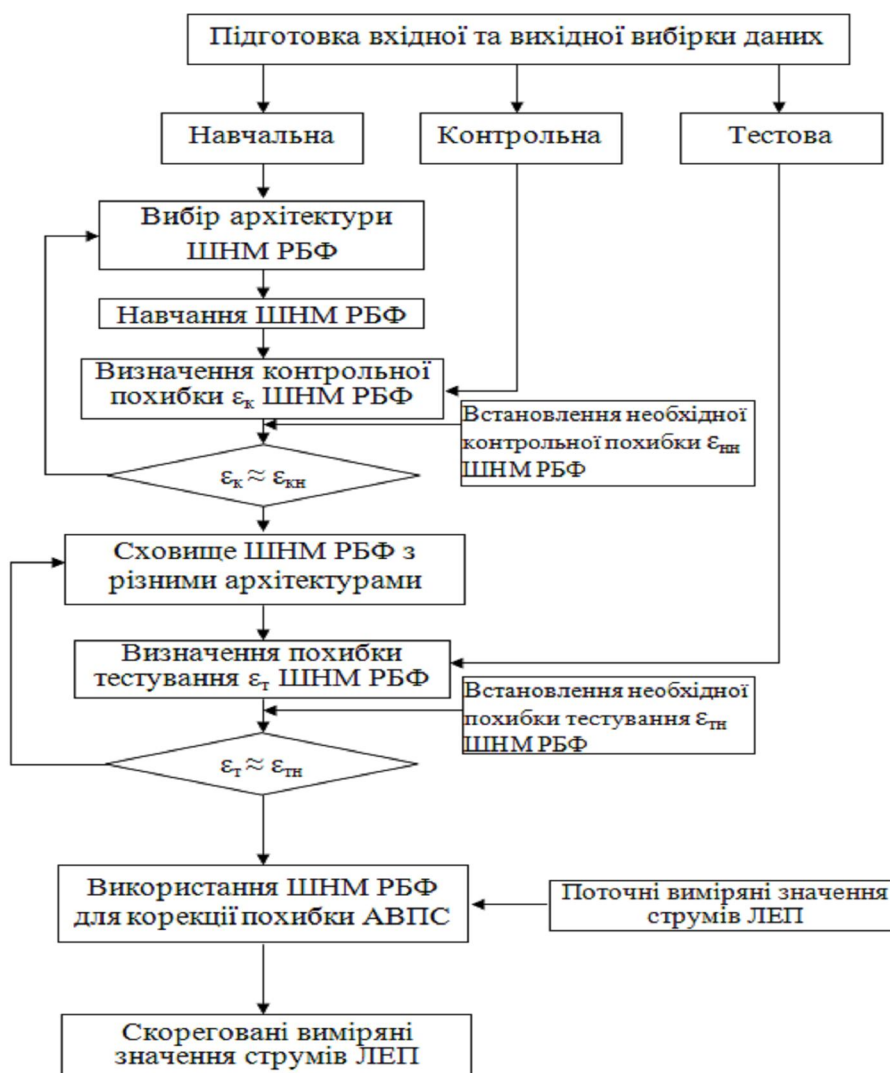


Рис. 3. Блок-схема алгоритму

Слід відзначити, що при виборі оптимальної архітектури ШНМ радіально-базисного типу необхідно враховувати похибку її роботи як на контрольній, так і на тестовій вибірках даних. Похибка роботи мережі на контрольній вибірці ( $\epsilon_k$ ) дозволяє відкинути заздалегідь малоефективні ШНМ радіально-базисного типу з точки зору їх архітектури та параметрів налаштування, зокрема і параметру  $\delta$ . Однак, врахування виключно  $\epsilon_k$  не дозволяє виявити ефекту «перенавчання», що, в свою чергу, потребує врахування похибки роботи мережі на тестовій вибірці даних ( $\epsilon_t$ ), що не приймали участь в навчанні. Таким чином, висновок про оптимальну архітектуру ШНМ радіально-базисного типу при розв'язанні задачі корекції похибки АВПС здійснюється на основі послідовного оцінювання відповідності похибок  $\epsilon_k$  та  $\epsilon_t$  встановленим необхідним значенням контрольної похибки ( $\epsilon_{кн}$ ) та похибки тестування ( $\epsilon_{тн}$ ).

Для визначення оптимальної архітектури ШНМ радіально-базисного типу при розв'язанні поставленої задачі використано програмний інструментарій ефективною підготовки нейронної мережі Statistica Neural Network, що в достатній мірі забезпечує можливість використання автоматизованих алгоритмів навчання та адаптації такої мережі, а також здійснює автоматизований вибір її оптимальної архітектури.

В ході досліджень при використанні запропонованого методу отримано наступні результати використання ШНМ радіально-базисного типу для проведення корекції похибки

АВПС. Стандартне відхилення ( $E$ ) для значень тестової вибірки та значень, що отримані ШНМ радіально-базисного типу склало 0,0001кА, а середня відносна похибка ( $F$ ) - 0,05%. При цьому, максимальна відносна похибка не перевищує 0,5% для усього діапазону значень тестової вибірки, що в абсолютних одиницях становить 0,7 (А). При цьому у більшості випадків різниця між еталонними значеннями тестової вибірки та апроксимованими ШНМ значеннями знаходиться в діапазоні від 0 до 0,2(А), а максимальні відхилення складають не більше 0,7 (А). Слід зазначити, що кількість випадків таких відхилень складає менше 1% від загальної кількості відхилень. Швидкість роботи обраної ШНМ радіально-базисного типу становить 0,0006 (секунд) в обраному програмному середовищі, що дозволяє зробити висновок про можливість та ефективність використання ШНМ радіально-базисного типу при роботі в темпі процесу вимірювання. При цьому така ШНМ реалізується на рівні контролера електронного блоку АВПС.

**Висновки.** Описаний в статті метод корекції похибки АВПС, як задачі ЦОС при вимірюванні миттєвих значень струму на ЛЕП високої напруги в усталеному режимі з використанням ШНМ, на відміну від існуючих, дозволяє враховувати діапазон припустимих похибок для вимірювальних виходів сучасних вимірювальних перетворювачів в діапазоні  $(0,01-1,2) \cdot I_{\text{ном}}$  ( $\pm 3\%$ ) і забезпечує точність АВПС в середньому на рівні 0,05% при максимальній відносній похибці до 0,5%. Крім цього, практична реалізація запропонованого методу, за рахунок властивостей ШНМ радіально-базисного типу, дозволяє досягти корекції похибки АВПС в темпі процесу вимірювання і забезпечити адаптацію такої мережі, як засобу ЦОС до зміни умов функціонування ЛЕП високої напруги.

#### Література

1. International Standard IEC 60044-7: Instrument transformers – Part 7: Electronic voltage transformers. – Geneva. – 2007. – 69 p.
2. International Standard IEC 60044-8: Instrument transformers – Part 8: Electronic current transformers. – Geneva. – 2007. – 124 p.
3. International Standard IEC 61850: Communication networks and systems in substations. – Geneva. – 2010. – 1835 p.
4. Танкевич Є. М. Організація обміну даними вимірювальних трансформаторів в інтегрованій АСУ ТП підстанції / Є.М. Танкевич, С. Є. Танкевич, І. В.Блінов // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність. Ч.1. – 2010. – С. 110-113.
5. Eichhorn K. Fr., Hosemann G., Schneider E. Digitale messungen von wechsel – und drehstromgroesen fuer die netzschutz und leittechnik // Elektrie, 1990, vol. 44, No.7. – P. 249 – 253.
6. Миронов В. Г. Основы технологий цифровой обработки сигналов. Ч. 1. Свойства сигналов и современные технические средства их обработки / В. Г. Миронов // Электричество. – 2001. – №3. – С. 55 – 65.
7. Беляев А. Н. Проектирование адаптивных автоматических регуляторов возбуждения с помощью нейронечеткого моделирования / А. Н. Беляев, С. В. Смолвик. // Электричество. – 2002. – № 3. – С. 2-9.
8. Lin W.-M., Yang C.-D., Lin J.-H., Tsay M.-T. A fault classification method by RBF neural network with OLS learning procedure // PWRD, 2001, vol. 16, No.4. – P. 473-477.
9. Zeynelgil H.L., Demiroren A., Sengor N.S. The application of ANN technique to automatic generation control for mutli-area power system // EPES, 24 (2002). – P. 345-354.