

ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЬ ПОШКОДЖЕНЬ НА ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Кириленко О.В., Блінов І.В.

*Інститут Електродинаміки НАН України
igorblinov@mail.ru*

This paper presents the use of probabilistic neural network to transmission line fault classification and use of feed-forward back propagation neural network to fault location in transmission line.

Вихід з роботи ліній електропередач (ЛЕП), як правило, приводить до знеструмлення споживачів та зниження надійності електропостачання. Тому однією з найважливіших є задача відновлення електропостачання шляхом швидкого й точного визначення місця пошкодження (ВМП) ЛЕП. При цьому під ВМП найчастіше розуміється визначення виду та місця короткого замикання (КЗ) на ЛЕП. Сьогодні найбільше застосування в практиці електроенергетичних систем (ЕЕС) знайшли технічні й програмні засоби ВМП, що основані на вимірюванні параметрів аварійного режиму (ПАР) з одного та двох боків ЛЕП з подальшим визначенням виду та розрахунку відстані до місця КЗ [1, 8]. Точність ВМП ЛЕП залежить не тільки від вибору методу ВМП, але також і від ступеню впливу похибок, що виникають внаслідок викривлення вхідної інформації для засобів ВМП ЛЕП. Існуючі методи ВМП ЛЕП досить чутливі до викривлення вхідних ПАР і, крім того, точність ВМП ЛЕП при вимірюванні ПАР з одного боку ЛЕП сильно залежить від значення перехідного опору в місці КЗ на ЛЕП [1, 6, 8]. Слід зазначити, що багато факторів, що впливають на точність ВМП, можуть бути враховані тільки побічним чином. Все це, а також прагнення використати всю доступну інформацію як апіорну, так і поточну, робить актуальним розробку нових більш точних методів розв'язання задачі ВМП ЛЕП, що мають здатність до адаптації та навчання [6, 7].

В останні 10-15 років спостерігається істотне підвищення інтересу до використання методів штучного інтелекту для розв'язання цілого ряду електроенергетичних задач, наприклад, [14-16]. Невід'ємною частиною цього процесу є застосування штучних нейронних мереж (ШНМ) для розв'язання задачі ВМП ЛЕП [2, 9-13]. З огляду на такі особливості ШНМ, як їх здатність до навчання та високі апроксимаційні здібності, треба зазначити, що доцільним є використання ШНМ, перш за все, для розв'язання задачі ВМП ЛЕП за умов виміру ПАР з одного боку ЛЕП, оскільки задача ВМП ЛЕП при вимірюванні ПАР з двох боків ЛЕП вирішується досить ефективно багатьма іншими методами [1, 6-8], у тому числі й на основі ШНМ.

Аналіз публікацій та наявний досвід попередньо проведених досліджень показав, що процес підготовки вибірок даних для навчання й тестування ШНМ повинен відбуватися з урахуванням наступних вимог. По-перше, дані в навчальній вибірці повинні бути розташовані "рівномірно", враховуючи особливості ШНМ як апроксиматорів, при цьому їхня "щільність" залежить від особливостей обраної ЛЕП і діапазону зміни ПАР. По-друге, кількість даних у навчальній вибірці не повинна призводити до ефекту "перенавчання" ШНМ, коли ШНМ не здатна розпізнавати значення, що не використовувались для її навчання. Особливість задачі ВМП ЛЕП не дозволяє підготувати належну навчальну вибірку, використовуючи тільки ретроспективну інформацію про режими КЗ на ЛЕП. Тому підготовка даних для навчання ШНМ вимагає попереднього створення моделі відповідної ЛЕП. Застосування засобів математичного моделювання необхідно для формування вибірок даних для підготовки ШНМ. Такі вибірки у загальному випадку повинні містити значення ПАР, до яких належать діючі значення струмів і напруги в момент КЗ. При цьому зазначені ПАР повинні бути поставлені у відповідність до виду КЗ і відстані до місця КЗ на ЛЕП.

Результати попередніх досліджень показали, що похибка ВМП з використанням ШНМ багато в чому залежить від адекватності моделі ЛЕП. Встановлено, що модель ЛЕП для розрахунків струмів і напруг в момент КЗ повинна враховувати велику кількість різних чинників. До таких чинників належать: параметри ЛЕП, зміна в широкому діапазоні перехідного опору в місці КЗ, різниця між векторами напруги вузлів приєднання ЛЕП, а також параметри режимів роботи ЛЕП, зокрема і ПАР. Встановлено, що доцільно розділити задачу ВМП з використанням ШНМ на дві відносно самостійні задачі. До першої належить одержання за допомогою моделювання аварійних режимів роботи ЛЕП значень струмів і напруг для різних випадків виду й місця КЗ на ЛЕП, а до другої - використання отриманих значень для ВМП ЛЕП з використанням ШНМ. Тому підготовку даних для навчання ШНМ було виконано за допомогою апробованих спеціалізованих програмних комплексів автоматизованого розрахунку аварійних режимів і струмів КЗ в електричних мережах електроенергетичних систем [5]. Такий інструментарій дозволяє адекватно враховувати ЛЕП при розрахунках аварійних режимів їх роботи. Побудова засобів ВМП ЛЕП з використанням ШНМ починається з вибору типу ШНМ. Розв'язання задачі визначення місця КЗ на ЛЕП потребує попереднього визначення виду КЗ, яка характеризується наявністю вираженої локалізації даних в областях простору рішень, що обумовлюється можливістю наявності певних видів КЗ на ЛЕП.

З огляду на особливості підготовки та використання ШНМ різного типу, а також на підставі експериментальних досліджень встановлено, що для розв'язання задачі визначення виду КЗ на ЛЕП (як задачі розпізнаван-

ня образів) доцільно використовувати радіально-базисні ШНМ, зокрема імовірнісну ШНМ (ІНМ)[2]. Особливістю ІНМ є те, що вона досить швидко навчається (у порівнянні з іншими типами ШНМ) навіть при великих розмірах навчальної вибірки. Крім того, архітектура ІНМ уточнюється в процесі навчання, що є перевагою ІНМ у порівнянні з іншими типами ШНМ, оскільки зникає потреба вибору кількості шарів і нейронів у прихованому шарі ІНМ, що спрощує процес підготовки ІНМ для визначення виду КЗ на ЛЕП.

Процедура підготовки ІНМ для визначення виду КЗ на ЛЕП складається з наступних етапів: підготовки навчальних і тестових вибірок даних, вибору параметрів налаштування ІНМ, навчання й тестування ІНМ. На рис.1.(а) наведена блок-схема процесу підготовки ІНМ.

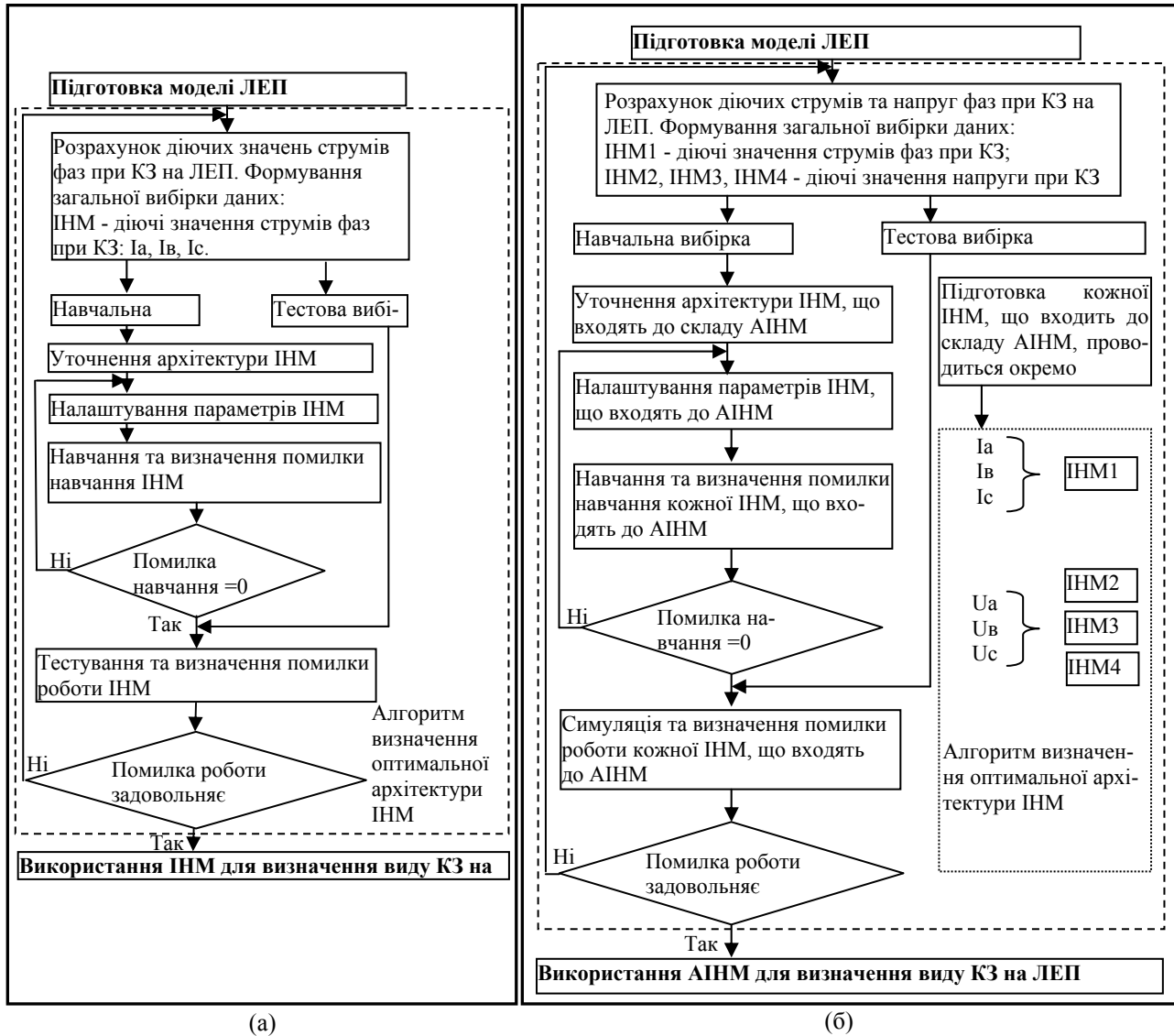


Рисунок 1 – Блок-схема процесу підготовки однієї ІНМ (а) та АІНМ (б) для визначення виду КЗ на ЛЕП

Використання ІНМ для визначення виду КЗ на ЛЕП при вимірюванні ПАР з одного боку ЛЕП дозволяє правильно визначати вид КЗ в умовах неповноти вхідної інформації, в якості ПАР використовуються тільки діючі значення струмів КЗ, при цьому значення перехідного опору в момент КЗ може змінюватися в діапазоні від 0 до 75 Ом [2]. Для розширення можливого діапазону зміни перехідного опору від 0 до 150 Ом та врахування викривлення вхідної інформації, пропонується методика розв'язання задачі визначення виду КЗ на ЛЕП із використанням ансамблю ІНМ (АІНМ), до якого входять чотири ІНМ. У такому АІНМ перша ІНМ визначає характер КЗ, що мало місце - однофазне, двофазне чи трифазне КЗ, при цьому така ІНМ не розрізняє - відбулося двофазне ($K^{1,1}$) чи двофазне КЗ на землю (K^2), однак визначає пошкоджені фази. Перша ІНМ в якості ПАР використовує діючі значення струмів фаз. Інші три ІНМ підготовлені для розпізнавання $K^{1,1}$ і K^2 для усіх випадків КЗ між фазами, в якості ПАР виступають діючі значення напруг фаз при КЗ на ЛЕП. Блок-схема процесу підготовки АІНМ для визначення виду КЗ наведена на рис.1.(б).

При дослідженні питань правильності визначення виду КЗ із застосуванням АІНМ встановлено, що застосування запропонованої методики при підготовці навчальної вибірки дозволяє збільшити крок дискретизації як по перехідному опору в місці КЗ, так і по відстані до місця КЗ при загальній, порівняно невеликій, кількості елементів навчальної вибірки. Це позитивно впливає на ефективність навчання ІНМ, не потребуючи збільшен-

ня часу на навчання ІНМ. В результаті було забезпечено безпомилкову роботу АІНМ для заданих діапазонів зміни перехідного опору в місці КЗ на ЛЕП. Таким чином, використання АІНМ для розпізнавання виду КЗ на ЛЕП дає кращі результати розпізнавання виду КЗ на ЛЕП у порівнянні із застосуванням тільки однієї ІНМ. На підставі аналізу результатів навчання й роботи ІНМ встановлено умови формування оптимальних навчальних і тестових вибірок даних, а також параметрів налаштування ІНМ. Визначення оптимальних вибірок даних, параметрів налаштування та, як наслідок, оптимальної архітектури ІНМ можливе із використанням, наприклад, алгоритму автоматизованого визначення оптимальної архітектури ІНМ [3], який враховує як помилки навчання, так і помилки тестування ІНМ, що досягаються за допомогою зміни параметрів налаштування ІНМ та розміру навчальної вибірки.

Аналіз впливу викривлення вхідної інформації на роботу ІНМ показав, що правильність визначення виду КЗ кожною з ІНМ, що входять до складу АІНМ, практично залишається незмінною, навіть при досить сильному викривленні вхідних ПАР. Так, наприклад, при викривленні вхідної інформації на 10%, помилка в роботі АІНМ має місце при розпізнаванні менш ніж у 0,5% випадків, а при викривленні до 5%, АІНМ практично безпомилково визначає вид будь-якого КЗ на ЛЕП. Такі результати роботи АІНМ свідчать про переваги запропонованого підходу до визначення виду КЗ на ЛЕП в умовах викривлення вхідної інформації, що має місце як при вимірах поточних значень ПАР, так і при підготовці розрахункових моделей ЛЕП для формування навчальних і тестових вибірок даних.

Для розв'язання іншої задачі - визначення місця КЗ на ЛЕП – запропоновано методику із використанням багатошарового перцептрон (БШП), оскільки визначення місця КЗ на ЛЕП з використанням ШНМ, вимагає розв'язання задачі апроксимації функції, яка ефективно розв'язується ШНМ з прямим поширенням сигналу та зворотнім поширенням похибки, тобто БШП. Відмінність запропонованої методики від існуючих полягає в оптимізації підготовки БШП з урахуванням похибки сучасних трансформаторів струму (ТС) та напруги (ТН), а також з урахуванням появи перехідного опору в місці КЗ, що може змінюватися в широкому діапазоні. Підготовку БШП для визначення місця КЗ необхідно виконувати окремо для кожного виду КЗ. Це дозволяє значно підвищити ефективність навчання БШП за рахунок того, що зменшується діапазон можливих рішень для БШП, спрощується процес визначення оптимальної архітектури та алгоритму навчання БШП. Запропоновано використовувати в якості ПАР діючі значення струмів і напруг кожної фази ЛЕП в момент КЗ, оскільки в цьому випадку БШП краще навчається за рахунок більш "представницької" навчальної вибірки, у порівнянні з методами, що використовують аналіз форми струмів та напруг при КЗ на ЛЕП.

У ході експериментально-дослідних робіт визначено оптимальні параметри навчання БШП, алгоритм навчання БШП [4] та вимоги щодо підготовки відповідних навчальних і тестових вибірок даних. На рис.2. наведена блок-схема процесу підготовки БШП для визначення місця КЗ на ЛЕП.

Результати досліджень показали, що при підготовці вибірок даних для навчання та тестування БШП необхідно обирати крок дискретизації по перехідному опору від 1,5 до 5 Ом, а крок дискретизації по відстані до місця КЗ в діапазоні від 3 до 10 км. Змінюючи ці показники можна підготувати оптимальну вибірку даних для ЛЕП різної довжини та класу напруги. Для того щоб уникнути ефекту "перенавчання" БШП необхідно встановлювати помилку навчання в діапазоні від 0,1 до 1%. Оптимальна архітектура БШП (кількість нейронів в прихованому шарі) визначається при порівнянні помилок роботи БШП (ϵ) з різними архітектурами. Обирається архітектура при якій похибка роботи БШП є мінімальною. Для урахування похибки ТС та ТН необхідно одночасно навчати БШП як на "точних" даних о ПАР, так і на викривлених даних, які можна отримати шляхом множення

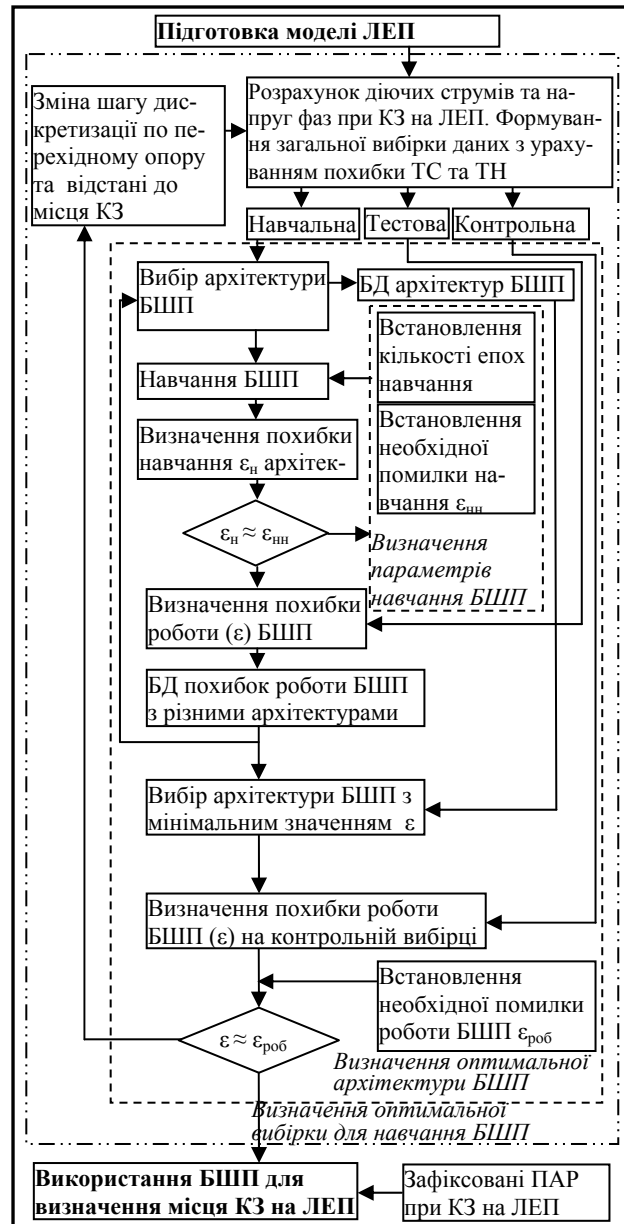


Рисунок 2 – Блок-схема процесу підготовки БШП для визначення місця КЗ на ЛЕП

“точних” даних на коефіцієнт, що враховує помилку ТС та ТН. Оптимальна вибірка даних для навчання БШП також визначається шляхом зрівнянні помилок роботи БШП для різних навчальних вибірок. Тестова вибірка побічним чином приймає участь у навчанні БШП, оскільки помилка роботи БШП може бути скоригована після тестування БШП. Тому необхідним є підготовка та використання контрольної вибірки. Результати експериментальної перевірки підтвердили працездатність запропонованої методики. Тестування БШП показали, що для діапазону зміни кратності струму КЗ $1,5 \div 40$ від доаварійного струму ЛЕП і діапазону зміни перехідного опору $0 \div 150$ Ом для всіх видів КЗ на ЛЕП напругою 330 кВ, середня похибка, яку дає БШП з урахуванням похибки ТС та ТН, не перевищує 5% (в окремих випадках, при умовах виникнення КЗ на ЛЕП, що сильно відрізняються від середньостатистичних, похибка може сягати 10%). Для діапазону зміни перехідного опору КЗ від 0 до 30 Ом похибка визначення місця КЗ на ЛЕП з використанням БШП знаходиться на рівні 1,2 %, при цьому максимальна похибка не перевищує 3% для всіх видів КЗ. Випадки невірної визначення видів КЗ, а також максимальні відхилення при визначенні місця КЗ на ЛЕП стосуються, переважно, значень ПАР, що виходять за межі навчання ШНМ. Тому навчання ШНМ потрібно проводити із застосуванням максимально можливого діапазону ПАР для ЛЕП, що розглядається. Ефективне розв’язання задачі комплексного ВМП ЛЕП при вимірюванні ПАР з одного боку ЛЕП вимагає одночасного застосування сукупності наведених типів ШНМ.

Практична реалізація запропонованих методик визначення виду та місця КЗ на ЛЕП високої напруги, при вимірюванні ПАР з одного боку ЛЕП, дозволяє знизити вплив як перехідного опору в місці КЗ, так і викривлення вхідної інформації на ефективність роботи засобів ВМП з використанням ШНМ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Аржанников Е.А., Лукьянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / Под ред. В.А. Шуина. - М.: Энергоатомиздат, 2003.-272 с.
2. Блинов И.В. Определение вида короткого замыкания ЛЭП на основе искусственных нейронных сетей. // Тех. электродинамика. Тем. выпуск. “Силовая электроника та енергоефективність” .2007. Ч.-5. С. 49-52.
3. Блинов И.В., Зозуля А.М. Определение оптимальной архитектуры искусственной нейронной сети для решения задачи определения вида КЗ на ЛЭП. Техн. электродинамика. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Ч.5.-2006.С.41- 42.
4. Блинов И.В., Лукьяненко Л.Н. Выбор алгоритма обучения искусственной нейронной сети для задачи определения места КЗ на ЛЭП. Праці ІЕД НАНУ. Вип. 18, 2007 - С. 42 - 46
5. Крылов В.А., Романенко Н.П., Колесникова Н.Ф. Программный комплекс V-VI-50ПЗ автоматизированных расчетов на ПЭВМ аварийных режимов и уставок РЗ в сложных электрических сетях. Збірник. // Праці Інституту електродинаміки НАН України. 2005. №2(1) С. 19-21.
6. Лямец Ю.Я., Ильин В.А., Подшивалин Н.В. Программный комплекс анализа аварийных процессов и определения места повреждения ЛЭП. – Электричество. – 1996. – №12. – С.2 – 7.
7. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Павлов А.О., Ефимов Е.Б.. Распознаваемость повреждений электропередачи. Ч.1. Распознаваемость места повреждения.–Электричество. – 2001. – №2. – С.16 – 23.
8. Шалыт Г.М., Айзенфельд А.И., Малый А.С. Определение мест повреждений линий электропередачи по параметрам аварийного режима. М.: Энергоатомиздат, 1983, 208 с.
9. Bouthiba T. Fault detection and classification technique in EHV transmission lines based on artificial neural networks. // European Transactions on Electrical Power. Vol. 15, Issue 5, 2004, p.p.: 443 - 454.
10. Bouthiba T. Fault location in EHV transmission lines using artificial neural networks. // Int. J. Appl. Math. Comput. Sci., 2004, Vol. 14, No.1, p.p.: 69–78.
11. Chen Z., Maun J.-C. Artificial neural network approach to single-ended fault locator for transmission lines. // IEEE Trans. Power Systems, vol. 15, № 1, 2000. p.p.: 370–375.
12. Oleskovicz M., Coury D.V., Aggarwal R.K. A complete scheme for fault detection, classification and location in transmission lines using neural networks. // Developments in Power System Protection, 2001, Seventh International Conference on (IEE) , 2001, p.p.: 335 – 338.
13. Osowski S., Salat R. Fault location in transmission line using hybrid neural network. // Int. J for Computation and Maths. in Electrical and Electronic Eng., Vol. 21, № 1, 2002 , p.p.:18-30. Kashtiban A. M., Tarafdar Haque M. Application of Neural Networks in Power System; A review. // Transactions on Engineering, Computing and Technology Vol.6., 2005. p.p.: 53 - 57.
14. Kaswtenny B., Saha M.M. Intelligent Systems applications to Power System Protection. // A special issue of The International Journal of Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering and Communication, Vol. 5, № 4, 1997, p.p.: 183–184.
15. Kezunovic M. Intelligent systems in protection engineering. // Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference on. vol.2. 2000, p.p.: 801-806.

Рекомендовано д.т.н. Сивокобиленко В.Ф.