

П.М. Баран, Р.С. Божик, В.П. Кідиба, Г.М. Лисяк, І.О. Сабадаш, Х.А. Проць
 Національний університет "Львівська політехніка",
 кафедра ЕСМ

ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ МЕРЕЖІ З ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛЮ ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ЗАХИСТІВ ВІД ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ

Ó Баран П.М., Божик Р.С., Кідиба В.П., Лисяк Г.М., Сабадаш І.О., Проць Х.А., 2011

Розроблена фізична модель мережі з ізольованою нейтралю для перевірки роботи захистів від однофазних замикань на землю.

Ключові слова: фізична модель, мережа з ізольованою нейтралю, однофазне замикання на землю.

Physical model of electrical network with isolated neutral was developed.. It is used for testing the maintenance of relay protection from single-phase of earth faults.

Key words: physical model, network with isolated neutral, single-phase of earth faults.

Постановка проблеми

Як відомо, в Україні всі мережі напругою вище ніж 1000 В до 35 кВ включно працюють з ізольованою або компенсованою (заземленою через дугогасильний реактор) нейтралю. Робота в такому режимі має деякі переваги порівняно з мережами, в яких нейтралі ефективно заземлені:

- можливість довготривалої роботи мережі за наявності в ній однофазного замикання на землю (ОЗЗ);
- велика імовірність самозагасання дуги, яка дуже часто виникає під час однофазних замикань на землю, тобто можливість самоліквідації пошкодження;
- простіша реалізація мережі, тому що немає потреби встановлювати пристрої робочого заземлення нейтралі.
- більше значення допустимого опору заземлення корпусів обладнання з умови напруги "дотику" порівняно з мережами з ефективно заземленими нейтралями.

Але такі мережі, як показав досвід експлуатації, мають деякі недоліки. Основними з них є:

- виникнення істотних перенапруг під час ОЗЗ, особливо, коли однофазні замикання на землю супроводжуються горінням дуги;
- велика імовірність виникнення ферорезонансних процесів, які супроводжуються перенапругами як на субгармоніках, так і на вищих частотах. Це приводить до виникнення однофазних замикань та подвійних замикань;
- прискорення старіння ізоляції внаслідок виникнення перенапруг;
- погіршення умов електробезпеки людей та тварин через можливе існування недопустимо великих напруг дотику під час ОЗЗ, а також існування небезпечних крокових напруг, особливо під час обривів провідників ліній електропередавання.

Як показує досвід експлуатації, в таких мережах кількість ОЗЗ становить до 75 % від загальної кількості усіх пошкоджень. У таких мережах під час виникнення ОЗЗ струм замикання не перевищує кілька або кілька десятків ампер. Тому в таких мережах дуже важко виконати селективний з достатньою чутливістю струмовий захист від ОЗЗ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналіз режимів мереж з ізольованою нейтралю під час ОЗЗ дає змогу виділити такі особливості [1]:

- під час металічного ОЗЗ виникає напруга нульової послідовності, яка за величиною практично дорівнює напрузі доаварійного режиму цієї фази, а за знаком – протилежна. Але напруга нульової послідовності може виникати і в інших режимах. Так, під час поздовжньої несиметрії, обумовленої, наприклад, неоднчасною комутацією під час увімкнення вимикачем всіх фаз. Також напруга нульової послідовності може виникати під час зовнішніх збурень, наприклад, під час зовнішнього к.з. з подальшим селективним вимкненням його відповідним захистом. Напруга нульової послідовності може виникати і під час ферорезонансних явищ, обумовлених комутаціями в мережі, а також за несиметрії параметрів обладнання мережі, насамперед повітряних ліній електропередавання. Тому під час застосування захистів від ОЗЗ, в яких використовується факт наявності напруги нульової послідовності, необхідно враховувати вище перелічені причини появи останньої, а значить і відповідного струму нульової послідовності;
- виникає струм нульової послідовності, який по відношенню до напруги нульової послідовності має практично ємнісний характер. На початку пошкодженої лінії величина цього струму визначається ємностями всього обладнання (ліній, шин тощо), які мають електричний зв'язок з пошкодженою лінією, крім ємності лінії, на якій відбулося пошкодження. Цей струм на початку пошкодженої лінії протікає від шин у лінію. У непошкоджених лініях величина цього струму зумовлена власними ємностями цих ліній відносно землі, і він протікає з лінії до шин. Величина цього струму є незначною, залежить від кількості та довжини ліній електрично зв'язаної мережі і може досягати величини від декількох ампер до кількох десятків ампер. У мережах з компенсованими нейтраліями характер розподілу струму нульової послідовності під час виникнення ОЗЗ має інший характер. Так, величина цього струму в пошкодженій лінії може бути близькою до нуля, або в результаті перекомпенсації струм у пошкодженій лінії може протікати з лінії до шин, як і в непошкоджених лініях;
- струм нульової послідовності містить гармонічні складові. Рівень їх є значним відносно струму основної частоти, особливо в мережах з компенсованими нейтраліями. Варто відмітити, що величина гармонічних складових є найбільшою в струмі пошкодженої лінії. Крім того, рівень вищих гармонічних складових істотно зростає під час ОЗЗ через дугу;
- може виникнути ферорезонанс, в результаті якого багатократно зростають струми в первинних обмотках трансформаторів напруги, що приводить до їх теплового пробою.

Враховуючи вищевказані особливості, у промисловості створено серійні пристрої захисту від ОЗЗ в мережах з ізольованою нейтраллю [2]. Але, як показав досвід експлуатації, ні один з цих пристроїв не може забезпечити потрібної чутливості та селективності роботи під час виникнення ОЗЗ в мережі.

Задача досліджень

Створення фізичної моделі для перевірки комплексної роботи захистів від однофазних замикань на землю на базі пристроїв "Альтра", які розробили співробітники Інституту мікропроцесорних систем керування об'єктами електроенергетики та кафедри електричних систем та мереж.

Виклад основного матеріалу

Для захисту електричних мереж від ОЗЗ застосовуються цифрові пристрої "Альтра" у взаємодії з пристроями "Міні-Альтра". Ці пристрої виконані на основі цифрової елементної бази [3, 4] та враховують особливості перехідних процесів, що спостерігаються в мережах з ізольованою нейтраллю. Реалізація відповідних алгоритмів дозволяє селективно визначати пошкоджене приєднання як в мережах з ізольованою, так і в мережах з компенсованою нейтраллю, а в комплексі з пристроями "Міні-Альтра" забезпечує селективне визначення пошкодженого фрагменту в складній мережі, де на проміжних розподільних пунктах (РП), як правило, відсутній контроль напруги.

Пристрій "Альтра" дає змогу контролювати до 12 приєднань одночасно. Схема приєднання пристрою наведена на рис. 1.

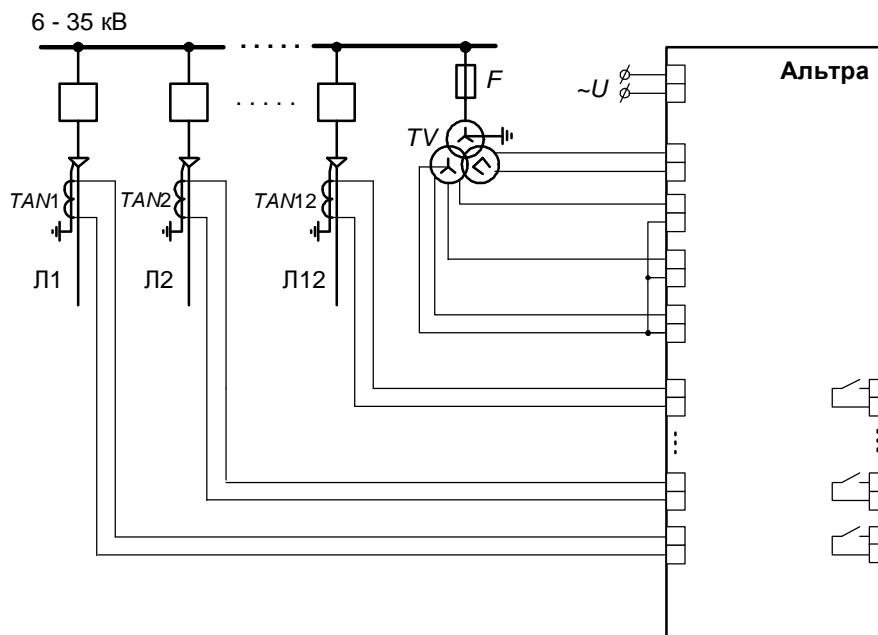


Рис. 1. Схема приєднання пристрою "Альтра"

Інформацією для функціонування пристрою "Альтра" є фазні напруги u_a, u_b, u_c та потрібне значення напруги нульової послідовності $3u_0$, які отримуються від секційного трансформатора напруги TV , а також потрібні значення струмів нульової послідовності $3i_0$, які отримуються від трансформаторів струму нульової послідовності TAN всіх контрольованих приєднань.

Пристрій "Міні-Альтра" встановлюється на підстанціях або РП, де відсутні трансформатори напруги, та може контролювати потрібне значення струмів нульової послідовності не більше ніж чотирьох приєднань. Схема приєднання пристрою "Міні-Альтра" наведена на рис. 2.

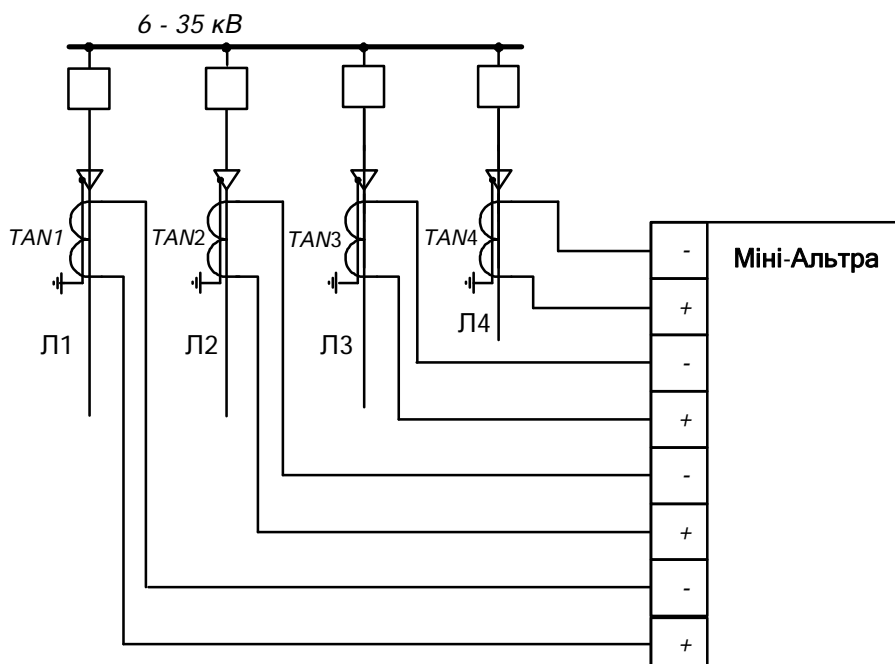


Рис. 2. Схема приєднання пристрою "Міні-Альтра"

Пристрої "Альтра" та "Міні-Альтра" одразу після виникнення ОЗЗ фіксують напрями струмів нульової послідовності у всіх контрольованих приєднаннях та для можливості проведення глибшого аналізу записують в пам'ять миттєві значення цих струмів.

Для налагодження роботи захистів від ОЗЗ реалізована фізична модель типового фрагменту міської мережі з ізольованою нейтраллю, принципова схема якої наведена на рис. 3.

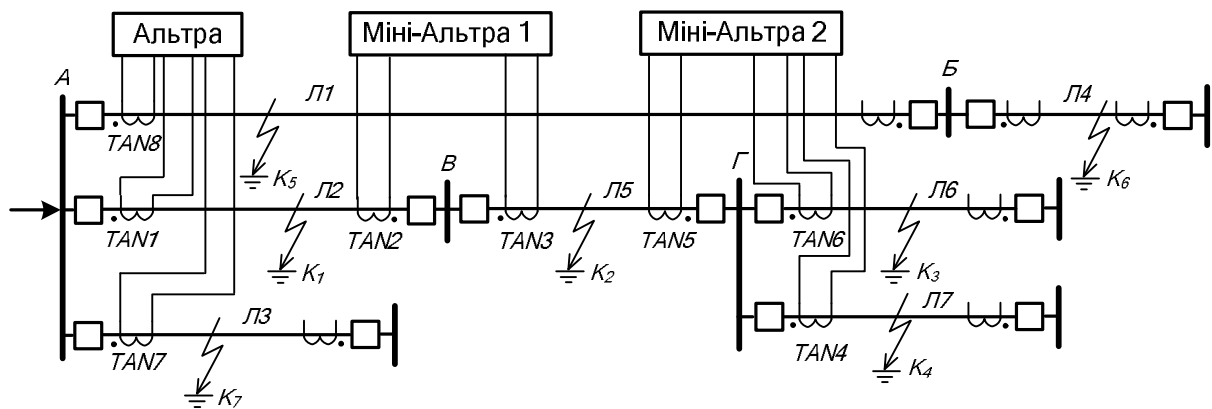


Рис. 3. Схема електричної мережі

Як видно з рис. 3, в мережі використовується один пристрій "Альтра", який встановлений на підстанції А, та два пристрої "Міні Альтра", встановлені на РП В та Г. У сукупності ці захисти забезпечують селективне визначення лінії, на якій відбулося ОЗЗ, за винятком лінії Л4 (ОЗЗ на лінії Л4 ідентифікуватиметься пристроєм "Альтра" як замикання на лінії Л1, оскільки на РП В не встановлений пристрій "Міні Альтра").

Використовуючи особливості, які характерні для ОЗЗ, розглядаємо заступну схему мережі лише для струмів нульової послідовності. Відповідна їй схема фізичної моделі наведена на рис. 4. Для моделювання ОЗЗ на лініях мережі джерело напруги нульової послідовності необхідно увімкнути у вибраному місці. У схемі фізичної моделі відсутні поздовжні параметри ліній – активні та індуктивні опори, тому що вони є набагато меншими за поперечні (ємнісні) опори ліній.

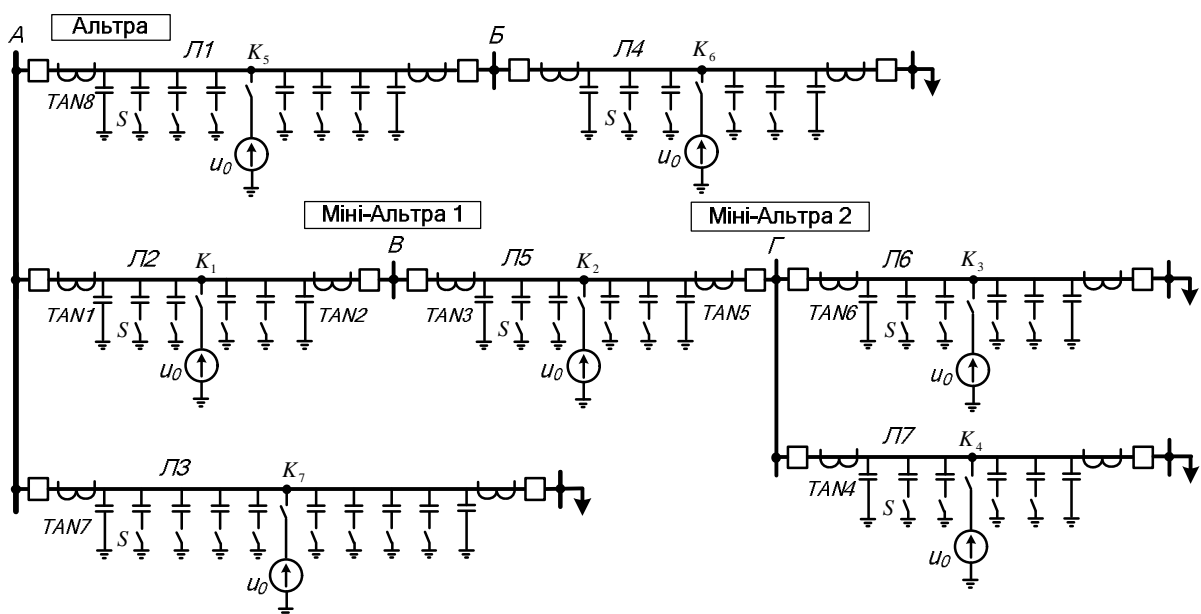


Рис. 4. Схема фізичної моделі мережі для моделювання однофазних замикань на землю

Для забезпечення подібності процесів фізичної моделі реальній мережі необхідно розрахувати масштабні коефіцієнти для напруги, ємності та струму [5]. Нижче наведено розрахунок масштабних коефіцієнтів для випадку виконання всіх ліній мережі 6 кВ однаковим кабелем з перерізом 150 мм² та питомим ємнісним струмом однофазного замикання на землю $I_{OЗЗ} = 1,1 \text{ А/км}$. Довжини ліній мережі прийняті такими: Л1 – 800 м, Л2 – 600 м, Л3 – 1000 м, Л4 – Л7 – 600 м.

Масштабний коефіцієнт для напруги

Номінальна фазна напруга електричної мережі дорівнює $U_{ном.ф} = \frac{6}{\sqrt{3}} = 3,46 \text{ кВ}$. Для фізичної моделі приймаємо $U_{фМ} = 27 \text{ В}$. Тоді масштабний коефіцієнт для напруги визначається як

$$m_U = \frac{U_{ном.ф}}{U_{фМ}} = \frac{3460}{27} = 128,15 \frac{\text{В}}{\text{В}}. \quad (1)$$

Масштабні коефіцієнти для ємності та опору

Питомий ємнісний опір лінії для нульової послідовності визначається як

$$x_{C0} = \frac{3 \cdot U_{ном.ф}}{I_{OЗЗ}} = \frac{3 \cdot 3460}{1,1} = 9436,36 \text{ Ом/км}. \quad (2)$$

а ємність лінії для нульової послідовності як

$$C_0 = \frac{1}{\omega \cdot x_{C0}} = \frac{1}{314,16 \cdot 9436,36} = 3,37 \cdot 10^{-7} \frac{\Phi}{\text{км}} = 337 \frac{\text{нФ}}{\text{км}}. \quad (3)$$

Ємність конденсатора фізичної моделі, який відображає ємність нульової послідовності ділянки лінії мережі довжиною l_∂ [км], становить $C_{кф} = 14,1 \text{ мкФ}$. Тоді масштабний коефіцієнт для ємності обчислюємо за виразом

$$m_C = \frac{C_0}{C_{кф}/l_\partial} = \frac{C_0 \cdot l_\partial}{C_{кф}}. \quad (4)$$

Для зазначених вище довжин ліній мережі доцільно прийняти $l_\partial = 100 \text{ м} = 0,1 \text{ км}$. Тоді масштабні коефіцієнти для ємності й опору (за однакової частоти змінного струму мережі та моделі) матимуть значення:

$$m_C = \frac{3,37 \cdot 10^{-7} \cdot 0,1}{14,1 \cdot 10^{-6}} = 2,39 \cdot 10^{-3} \frac{\Phi}{\Phi};$$

$$m_Z = \frac{1}{m_C} = \frac{1}{2,39 \cdot 10^{-3}} = 418,4 \frac{\text{Ом}}{\text{Ом}}. \quad (5)$$

Масштабний коефіцієнт для струму

За масштабними коефіцієнтами для напруги й опору визначаємо масштабний коефіцієнт для струму:

$$m_I = \frac{m_U}{m_Z} = \frac{128,15}{418,4} = 0,306 \frac{\text{А}}{\text{А}}. \quad (6)$$

Для фізичної моделі мережі здійснюємо розрахунок еквівалентних ємностей нульової послідовності кожної лінії, враховуючи значення масштабного коефіцієнта m_C , та виставляємо їх значення за допомогою перемикачів S (рис. 4). Кожен перемикач комутує ємність 14,1 мкФ.

Почергово для кожної лінії моделюється однофазне замикання на землю подаванням напруги u_0 в місці ОЗЗ, тобто на клему K_i , де i номер точки ОЗЗ на лініях. Визначення пошкодженої лінії мережі здійснюється за показами пристроїв "Альтра" та "Міні-Альтра" шляхом аналізу напрямів струмів нульової послідовності в лініях мережі. За додатний приймаємо напрям струму нульової послідовності з шин у лінію.

Під час під'єднання пристроїв "Альтра" та "Міні-Альтра" до трансформаторів струму нульової послідовності необхідно враховувати їхню полярність. За даними роботи пристроїв "Альтра" та "Міні-Альтра" формується таблиця, в якій записуються зафіксовані цими пристроями напрями струмів нульової послідовності в контрольованих приєднаннях під час ОЗЗ в різних точках мережі.

Для прикладу в таблиці вказані напрями струмів нульової послідовності, зафіксовані пристроями "Альтра" та "Міні-Альтра" на лініях фізичної моделі мережі під час ОЗЗ у всіх зображених на рис. 4 точках. На основі даних таблиці визначається місце пошкодження в мережі (останній стовпець таблиці).

Напрями струмів нульової послідовності в мережі під час ОЗЗ

Дослід	Л1		Л2		Л3(т)	Л4(т)	Л5		Л6(т)	Л7(т)	Місце ОЗЗ
	TAN8 (поч.)	(кін.)	TAN1 (поч.)	TAN2 (кін.)	TAN7 (поч.)	(поч.)	TAN3 (поч.)	TAN5 (кін.)	TAN6 (поч.)	TAN4 (поч.)	
1	-		-	+	⊕		-	+	-	-	Л3 (К ₇)
2	-		⊕	⊕	-		-	+	-	-	Л2 (К ₁)
3	-		+	-	-		⊕	⊕	-	-	Л5 (К ₂)
4	-		+	-	-		+	-	-	⊕	Л7 (К ₄)
5	-		+	-	-		+	-	⊕	-	Л6 (К ₃)
6,7	⊕		-	+	-		-	+	-	-	Л1 (К ₅) або Л4 (К ₆)

Примітка. "+" – струм нульової послідовності протікає з шин у лінію, "-" – струм нульової послідовності протікає з лінії до шин.

Для визначення місця виникнення ОЗЗ на фізичній моделі і відповідно у реальній мережі необхідно скористатись такими правилами:

- 1) якщо струм нульової послідовності на початку лінії протікає з шин в лінію, то ОЗЗ має місце у напрямі цієї лінії;
- 2) якщо струми нульової послідовності на початку та в кінці лінії одночасно протікають з шин в лінію, то ОЗЗ має місце на цій лінії;
- 3) для тупикової лінії (т) достатньо контролювати напрям струму нульової послідовності лише на її початку;

якщо струми нульової послідовності всіх ліній, приєднаних до певної системи шин підстанції, протікають з ліній до шин, то ОЗЗ має місце на цих шинах.

Аналіз даних таблиці показує, що за результатами всіх дослідів, крім дослідів 6 і 7, можна однозначно визначити лінію електричної мережі, на якій виникло ОЗЗ. За результатами ж дослідів 6 і 7 можна лише визначити, що ОЗЗ виникло у напрямі лінії Л1, тобто на цій лінії Л1 або на лінії Л4, або на системі шин РП Б. Для усунення такої невизначеності необхідно встановити на РП Б пристрій "Міні-Альтра" для контролю струмів нульової послідовності в кінці лінії Л1 та на початку лінії Л4.

Висновки

Створена фізична модель з достатньою точністю дозволяє моделювати процеси під час ОЗЗ в електричних мережах 6 (10) кВ з ізольованою нейтраллю.

Фізична модель легко адаптується для приєднання цифрових пристроїв захисту від ОЗЗ "Альтра" та "Міні-Альтра".

На фізичній моделі можна перевірити уставки спрацювання вимірних органів захистів від ОЗЗ.

Результати перевірки селективності роботи цифрових пристроїв "Альтра" та "Міні-Альтра" під час ОЗЗ в різних точках мережі показали високу ефективність функціонування запропонованої фізичної моделі.

1. Кідиба В.П., Шелепєть Т.М. *Захист ліній електропередавання*. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2004.– 185 с. 2. *Справочник по наладке вторичних цепей електростанцій*

и подстанций / А.А. Антюшин, А.Е. Гомберг, В.П. Караваяев и др.; Под ред. Э.С. Мусаэляна. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 384 с. 3. Сабадаш І.О. Новітні мікропроцесорні технології в експлуатації мереж 6–35 кВ // *Електрические сети и системы*. – 2011. – № 6. 4. Базилевич М.В., Божик Р.С., Сабадаш І.О. Мікропроцесорна інформаційно-діагностувальна система "Альтра" для селективного визначення приєднання з уземленою фазою // *Енергетика і електрифікація*. – К., 2003. – № 7. – С. 91–95. 5. Перхач В.С. *Обчислювальна техніка в електроенергетичних розрахунках*. – Львів: Вища шк., 1978. – 280 с.

УДК 621.3.078; 681.532.55

Ю.О. Бобечко, І.Р. Головач, А.О. Лозинський
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра ЕМА

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ПРЯМОГО ПОШИРЕННЯ СИГНАЛУ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ КУТА ПОЛОЖЕННЯ РОТОРА ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГУНА

© Бобечко Ю.О., Головач І.Р., Лозинський А.О., 2011

Для створення бездавачевої системи керування вентильним реактивним двигуном (ВРД) синтезовано структуру штучної нейронної мережі (ШНМ) прямого поширення сигналу, входними величинами якої є фазні струми. Методом комп'ютерного симулювання досліджено роботу бездавачевої системи керування з використанням синтезованої ШНМ.

Ключові слова: вентильний реактивний двигун, штучна нейронна мережа, математична модель, бездавачева система керування.

To create a sensorless control system of switched reluctance motors (SRM), a feedforward artificial neural network (ANN), that uses currents as the input signals, was synthesized. By computer simulation was researched the work of the sensorless control system using created ANN.

Key words: switched reluctance motor, artificial neural network, mathematical model, stnsorless control system.

Постановка проблеми

Вентильні реактивні двигуни (ВРД), відомі у світі як SRM (switched reluctance motors), набули широкого застосування у різноманітних електроприводах завдяки простій будові, високому коефіцієнту корисної дії, високій надійності, широкому діапазону робочих швидкостей, можливості роботи в агресивних середовищах і за високих температур, добрих умов охолодження тощо. З іншого боку, до часто згадуваних недоліків цього типу двигунів належать пульсації крутного моменту, акустичні шуми і необхідна наявність давача положення ротора [1, 2]. Сьогодні розроблено багато ДПР, однак усі вони ускладнюють конструкцію та технологію виготовлення ЕМП, підвищують експлуатаційні вимоги, вимагають додаткового апаратного забезпечення для оброблення сигналів, обмежують галузь застосування тощо. Наявність давача положення ротора підвищує вартість та знижує надійність вентильних двигунів.

Останнім часом відбувається новий етап розвитку вентильних приводів, що характеризується спрощенням апаратної структури приводу за рахунок ускладнення програмної. Все більшого поширення набувають дослідження, спрямовані на створення ефективних алгоритмів управління ВРД. Застосовують методики з інших галузей: створення різноманітних детекторів, фільтрів тощо.