

УДК 631.514

**Ю. О. Варецький, д. т. н., проф.; Т. І. Наконечний, М. Д. Федонюк,
В. О. Комар, к. т. н.**

АРХІТЕКТУРА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ НЕСИНУСОЇДНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

Запропоновано нову концепцію моніторингу несинусоїдних режимів електричної мережі на основі непрямих вимірювань параметрів режиму. Для оцінки показників несинусоїдності напруги на шинах підстанцій електричної мережі з нелінійними навантаженнями використано штучну нейронну мережу. Наведено приклад реалізації запропонованої системи моніторингу.

Ключові слова: електрична мережа, нелінійні навантаження, несинусоїдний режим, моніторинг якості електроенергії, штучна нейронна мережа, моделювання.

Актуальність проблеми

У поточному десятилітті проблема якості електроенергії в електричних мережах привертає до себе все більшу увагу. Серед електромагнітних збурень, які визначають якість електроенергії, важливе місце займають вищі гармоніки (далі гармоніки). Це пов'язано з тим, що частка електроприймачів з нелінійними вольт-амперними характеристиками у системах електропостачання постійно зростає. У значній мірі це обумовлено стрімким розвитком напівпровідникової техніки та суттєвою економічною вигодою від її застосування як у промисловій, так і у комунальній сферах. З іншого боку, практично усі електричні мережі характеризуються постійними змінами навантаження. Такі зміни можуть мати як добовий чи сезонний характер, так і випадковий – тобто залежати від потреб виробництва, і відбуватися навіть кілька разів протягом хвилини. Якщо ж у системі електропостачання змінних нелінійних навантажень застосовують конденсатори для покращення коефіцієнта потужності, то внаслідок резонансного підсилення гармонік в цих умовах можуть відбуватися пошкодження силового обладнання та інші небажані впливи на системи керування та виробничі процеси.

За оцінками експертів європейських дослідницьких організацій проблеми, які пов'язані з якістю електроенергії, коштують промисловості і бізнесу десятки мільярдів € у рік [1]. Поряд з тим, за цими ж оцінками, додаткові витрати на засоби запобігання вказаних збитків не перевищують 5% їхньої вартості. До цього часу в Україні не вдається задіяти чинні вимоги норм якості електроенергії, організаційно та законодавчо не забезпечено процедуру контролю показників якості електроенергії та дієву систему реєстрації та розгляду скарг. Оперативний та експлуатаційний персонал електропостачальних компаній і комерційних об'єктів не може вирішити питання обґрунтування обсягу інвестицій, які необхідно спрямувати на запобіжні заходи і засоби, аби уникнути можливих небажаних наслідків проблеми. Одним із важливих завдань у вирішенні вказаної проблеми є організація та технічне забезпечення системи моніторингу несинусоїдних режимів електричних мереж.

Принципи організації та завдання моніторингу

Моніторинг якості електроенергії в електричній мережі проводять, щоб охарактеризувати зміну показників якості протягом певного відрізка часу. Залежно від особливостей електричної мережі моніторинг може здійснюватись неперервно (на базі стаціонарних пристроїв), періодично (з певною визначеною періодичністю, наприклад, раз в рік) або за необхідністю (у процесі впровадження нових потужних електроприймачів, компенсуючих

пристроїв тощо).

Перед проведенням моніторингу несинусоїдності напруги на предмет її відповідності нормам якості електроенергії необхідно здійснити попередній аналіз електричної мережі й окреслити коло можливих питань, які вимагатимуть дослідження, а також визначити точки у яких необхідно здійснювати моніторинг і величини, які будуть контролюватися. Це дозволяє раціонально використати наявні в електричній мережі засоби та скоротити витрати на проведення моніторингу. Перед проведенням моніторингу [2] доцільно зібрати наступну інформацію:

- 1) характеристика обладнання, що є джерелом гармонік;
- 2) характеристика обладнання чутливого до гармонік;
- 3) час, коли з'являються найбільш несприятливі умови;
- 4) супутні проблеми чи явища, що з'являються в мережі, коли загострюється проблема гармонік (наприклад, увімкнення конденсаторних батарей);
- 5) фактичний стан обладнання, що використовується в мережі;
- 6) паспортні дані обладнання даної електричної мережі.

Необхідно зазначити, що згідно з рекомендаціями чинного стандарту [3] спостереження за рівнем несинусоїдності режиму електричної мережі потрібно здійснювати не менше одного тижня. Точки моніторингу гармонік доцільно вибирати якомога ближче до чутливого до несинусоїдності обладнання (споживачів). Важливо також мати дані про усі зміни конфігурації електричної мережі (ввімкнення / вимкнення конденсаторних батарей, фільтрів гармонік, секцій шин, трансформаторів тощо). Переважно у розподільчих електричних мережах здійснюють моніторинг гармонік напруги. Проте в процесі аналізу режимів роботи фільтро-компенсувальних пристроїв доводиться вимірювати гармоніки напруги і струму. Необхідно зазначити, що для коректного аналізу проблеми, вимірювання гармонік напруги і струму повинно відбуватися одночасно.

Для забезпечення електромагнітної сумісності в електричній мережі показники несинусоїдності напруги у "спільній точці" повинні знаходитись у межах норм чинного стандарту. Процедура перевірки здійснюється на підставі відповідних вимірювань. Такі вимірювання проводять акредитовані у встановленому порядку лабораторії згідно з наведеною у [3] нормативною методикою за допомогою сертифікованих спеціальних вимірних пристроїв – аналізаторів гармонік. Очевидно, що проводяться такі вимірювання нечасто, тому інформація про фактичний стан справ у мережі може бути відсутньою протягом тривалого часу, а отже, мережа та споживачі тривалий час можуть зазнавати негативного (у випадку не відповідності нормам) впливу гармонік.

З впровадженням енергоощадних технологій постійно зростає кількість нелінійних електроприймачів у електричних мережах. Постійні зміни їх навантажень, пов'язані з цим зміни режимів компенсувальних пристроїв викликають зміну значень гармонік напруг та струмів у часі. Це обґрунтовує доцільність неперервного контролю несинусоїдності режиму в електричній мережі. Проте вимірювання показників несинусоїдності режиму в розподільній електричній мережі вимагає застосування спеціальних вимірних пристроїв, котрі рідко стаціонарно встановлюються на підстанціях через їхню високу вартість. Крім того, лише на вузлових підстанціях є постійний оперативний персонал для обслуговування цих приладів та спостереження за їхніми показниками. Аналіз проблеми показує, що бажаними є засоби здійснення неперервного нагляду (моніторингу) за режимом роботи мережі, які за допомогою мінімальної кількості приладів та телевимірів дозволили б черговому диспетчеру здійснювати оцінку несинусоїдності напруги у контрольних точках, і, у випадку появи небезпечних (незапланованих) режимів, приймати можливі заходи з їх усунення. На відміну від вимірювань, які проводять акредитовані лабораторії з використанням спеціальних вимірних пристроїв для встановлення відповідності показників нормам якості, такий моніторинг здійснюють з метою відобразити характер змін несинусоїдності режиму роботи мережі та вказати на можливі проблемні точки. Важливою

особливістю моніторингу є можливість спостереження в масштабі реального часу за зміною режиму заданої частини мережі, а не лише однієї підстанції. Крім того, такий моніторинг не висуває жорстких вимог до точності вимірних пристроїв та допускає визначення тих чи інших показників несинусоїдних режимів на основі доступних на підстанціях вимірювань. Зібравши та проаналізувавши дані, які отримано в результаті моніторингу, можна приймати рішення про необхідність проведення вимірювань на шинах того чи іншого споживача з застосуванням спеціалізованих аналізаторів гармонік.

У періодичній літературі відомо певні методи вирішення проблеми адекватного оцінювання джерел вищих гармонік в умовах неповного обладнання мережі засобами вимірювання. У роботах [4, 5] запропоновано рішення, які ґрунтуються на традиційних підходах. З іншого боку, деякі підходи, які використовують методологію штучних нейронних мереж для визначення характеристик джерел гармонік в електричній мережі, запропоновано у роботах [6, 7]. Зокрема, в опублікованих у статті [7] дослідженнях, структурну нейронну мережу було використано для визначення величин гармонік в електричній мережі з нелінійними споживачами, яка обладнана невеликою кількістю стаціонарних пристроїв вимірювання гармонік.

Принципи побудови інтелектуальної системи моніторингу

Вислів “інтелектуальна система” часто застосовують, щоб представити будь-яку комбінацію з використанням *штучних нейронних мереж* (далі *нейронних мереж*), експертних систем, систем нечіткої логіки, а також інших технологій, зокрема, таких як генетичні алгоритми. На відміну від класичного керування, інтелектуальні стратегії керування не потребують математичних моделей реальних об’єктів. Порівняно з людиною комп’ютер зі штучним інтелектом може надзвичайно швидко вирішувати проблеми. Він працює неперервно “без втоми”, не піддається впливу емоцій та інших людських недоліків. Ці системи побудовано на математичних співвідношеннях, які успатковують свій “розум” або “знання” від окремих спеціалістів-експертів чи задокументованих даних спостережень, поданих звичайно у формі вхідних / вихідних пар.

Традиційні інженерні підходи передбачають опис будь-яких фізичних явищ, незважаючи на міру їх складності, на основі співвідношень, які можуть бути розвинуті безпосередньо з фізичних принципів на рівні окремого елемента чи складової. З таким підходом пов’язано дві головні проблеми, які виникають під час розгляду реальних технічних задач:

1) задача настільки складна, що створення точної математичної моделі є нереальним завданням і для уникнення цієї проблеми на підставі загальноприйнятих технічних припущень використовується наближений аналіз;

2) складність задачі може вносити невизначеність, яку необхідно враховувати певною апроксимацією.

У загальному випадку, співвідношення між змінними входу і виходу тільки приблизно відомі і потрібно прикласти багато зусиль для знаходження прийнятних наближених співвідношень. Системи нейронних мереж мають здатність автоматично “вивчити” наближені співвідношення між входами і виходами, оминаючи подолання проблеми розміру і складності задачі. Часто ці наближені співвідношення є ефективнішими від одержаних на підставі фізичного опису явища внаслідок того, що вони звичайно ґрунтуються на фактичних значеннях вхідних і вихідних змінних (наприклад, даних вимірювань) і є вільними від суб’єктивних особливостей конкретних теорій, які ґрунтуються на упереджених ідеях людини. Крім того, нейронна мережа не потребує будь-якої інформації про самі залежності чи їх ефективність, котра визначається вибраним законом опису явища. До того ж похибка наближення може бути поступово зменшена, завдяки більшій кількості вхідної інформації. Теоретично нейронні мережі можуть “навчитися” забезпечувати точні співвідношення між вхідними та вихідними даними.

Взагалі, системи нейронних мереж здатні до “вивчення” залежностей у заданій повній

Наукові праці ВНТУ, 2010, № 1

множині даних і встановлення співвідношень вхід-вихід, ґрунтуючись виключно на певній підмножині даних. Тому бажано для даних підмножини, на яких система “навчається”, щоб вони відображали повну множину даних. Залежності, яких “не видно” у вибраній підмножині даних, не будуть “вивчені” нейронною мережею. Потрібно зазначити, що ті ж обмеження стосуються і звичайних алгоритмів регресії та класифікації.

Як зазначено вище, неперервне спостереження за рівнем гармонік в електричних мережах може здійснюватися спеціально утвореною інформаційною мережею, яка передає дані вимірювань від аналізаторів гармонік, розміщених у різних місцях електричної мережі, до пунктів оперативно-диспетчерського керування. Авторами запропоновано концепцію побудови системи моніторингу несинусоїдного режиму, яка *не потребує встановлення аналізаторів гармонік у контрольованих пунктах мережі* і створення спеціальної мережі передачі результатів вимірювання до пункту спостереження [8, 9]. Для цього вона передбачає використання існуючих каналів телевимірювання та наявних на підстанціях електричної мережі вимірювальних пристроїв. Для реалізації цього способу запропоновано використати нейронну мережу, завданням котрої є “розпізнавання” (ідентифікація) значень показників несинусоїдності режиму на шинах розподільчих підстанцій електричної мережі, коли маємо у своєму розпорядженні тільки значення параметрів режиму електричної мережі у пункті спостереження (відповідні активні та реактивні потужності, струми, коефіцієнти потужності тощо). Принципову схему функціонування такої системи показано на рис.1.



Рис. 1. Принципова схема функціонування системи ідентифікації несинусоїдного режиму

За суттю, це непрямі вимірювання показників несинусоїдності режиму, оскільки коефіцієнти несинусоїдності та коефіцієнти гармонічних складових напруги тут отримують не на підставі аналізу форми кривої напруги, а шляхом “розпізнавання” їх значень за встановленими штучною нейронною мережею зв’язками зі значеннями виміряних у різних пунктах електричної мережі потужностей, струмів тощо.

Відомо, що спектр гармонік та їх величини в електричній мережі залежать від фактичного споживання активної та реактивної потужностей нелінійними навантаженнями, режиму роботи компенсувальних пристроїв та конфігурації мережі. Зрозуміло, що в умовах постійних змін цих факторів дуже важко встановити чітку функційну залежність між ними та величинами гармонік у різних пунктах електричної мережі. Тому можливість застосування для розв’язування цієї задачі інтелектуальної системи, яка здатна встановити потрібні зв’язки, є дуже привабливою ідеєю.

Під час створення такої інтелектуальної системи найбільшою проблемою є задача отримання тренувальної множини даних. Використовуючи натурні вимірювання, дуже складно отримати усі необхідні дані для тренування нейронної мережі. Тобто, складно зібрати множину даних усіх характерних режимів роботи протягом короткого періоду часу. Авторами запропоновано отримати таку множину даних на базі моделювання у часовій області певного набору режимів електричної мережі з нелінійними навантаженнями. Отримані таким чином відповідності вхідних та вихідних даних складають потрібну тренувальну множину.

Наступною задачею є вибір структури нейронної мережі та доцільного методу її тренування. Як відомо, немає чітких критеріїв, щоб заздалегідь вибрати оптимальну структуру нейронної мережі та найкращий метод її тренування для заданої задачі. Тому часто обирають найпоширеніший підхід. Для задач електроенергетики переважно використовують нейронні мережі прямого поширення, які добре себе зарекомендували у багатьох задачах і тренування яких здійснюють на базі тренувального алгоритму “оберненого розповсюдження” (backpropagation). Тренувальний алгоритм “оберненого розповсюдження” є методом ітеративного налаштування вагових коефіцієнтів до моменту, поки бажаний рівень точності не буде досягнуто. Він ґрунтується на методі оптимізованого пошуку градієнта функції похибки. Типовою функцією похибки є функція середньоквадратичної похибки, яка ілюструється виразом (1), де N є загальною кількістю вихідних даних y_1, y_1, \dots, y_N , які використовують у процесі навчання:

$$e = \sum_{i=1}^N (y_{i\text{розрах}} - y_{i\text{бажане}})^2. \quad (1)$$

Множина N і пов'язані з нею виходи становлять “тренувальну множину” і є звичайною підмножиною повної множини даних. Для отримання найкращих результатів, тренувальна множина повинна адекватно представити всі очікувані зміни в повній множині даних. Тому важливим є правильний вибір меж зміни параметрів навантажень та конфігурацій електричної мережі в процесі моделювання.

Більшість систем нейронних мереж можна зробити дуже точними (ґрунтуючись на тренувальних даних) за допомогою збільшення кількості прихованих шарів і вузлів у цих шарах. Проте у будь-якому методі апроксимації нелінійних функцій є випадки, коли збільшення кількості незалежних змінних робить систему більш “вразливою” до змін у вхідних даних. Тому велика кількість прихованих шарів і прихованих вузлів шару може зробити нейронну мережу дуже точною для тренувальних даних, але зміни, які будуть представлені в наступних даних (не включених у процес тренування), можуть спричинити великі відхилення від очікуваного результату на виході. У таких випадках говорять, що мережа “запам'ятала” знайдені в тренувальних даних співвідношення швидше, ніж “вивчила” більш загальні співвідношення. Тому необхідно вибрати компроміс між кількістю шарів, вузлів і ступенем точності, доступної з цими тренувальними даними.

Аналізуючи задачу, сформульовано декілька правил, котрих доцільно дотримуватися під час вибору конфігурації нейронної мережі для розглянутого випадку:

- Вхідну множину нейронної мережі вибирають експериментальним шляхом з врахуванням доступних на підстанціях мережі телевимірів та даних стаціонарних вимірних пристроїв гармонік. Процес вибору достатньої кількості вхідних даних є ітераційним і його завданням є встановлення оптимальної кількості телевимірів для адекватної роботи нейронної мережі. Небажаними є як надлишок, так і нестача вхідної інформації. Надлишок даних може призвести до впливу на результат оцінки неістотних факторів, а нестача – зробити нейронну мережу нечутливою до певних змін.

- Для магістральних електричних мереж достатньо використовувати двошарову нейронну мережу прямого поширення. Кількість нейронів у прихованому шарі приймають рівною півсумі кількості вхідних та вихідних сигналів. Згідно з особливостями електричних мереж вхідними даними можуть бути потужності, діючі значення струмів, коефіцієнти потужності нелінійних навантажень підстанцій мережі, перетоки активної та реактивної потужностей по лініях, показники несинусоїдності напруги на шинах головної підстанції зі стаціонарним пристроєм вимірювання гармонік.

- Тренувальну множину даних нейронної мережі формують так, щоб з певним кроком охопити весь діапазон можливих режимів роботи електричної мережі та, за можливістю, включати характерні режими. Розмір тренувальної множини також визначається експериментально та коректується до забезпечення бажаної точності нейронної мережі.

– Використовуючи особливість природи гармонік, тобто можливість аналізу електричної мережі окремо для кожної гармоніки, доцільно сформувати загальну структуру з окремих паралельних нейронних мереж для кожної з можливих гармонік. Це суттєво спростить структуру нейронної мережі та полегшить процес її тренування.

Приклад побудови інтелектуальної системи моніторингу

Для дослідження взято фрагмент електричної мережі з тяговими підстанціями, котрі є джерелами гармонік. Живлення таких підстанцій переважно здійснюється магістральними лініями на 3 – 6 підстанціях від шин 110 кВ вузлових підстанцій. Це пов'язано з тим, що як правило, уникають роботи розподільчих мереж у замкнутому або складно замкнутому режимі для запобігання небажаних транзитних перетоків та підвищення надійності живлення відповідальних споживачів. Живлення тягової системи здійснюється за схемою 6-ти пульсного некерованого напівпровідникового перетворювача. Однолінійну схему такої магістральної розподільчої електричної мережі 110 кВ зображено на рис. 2.

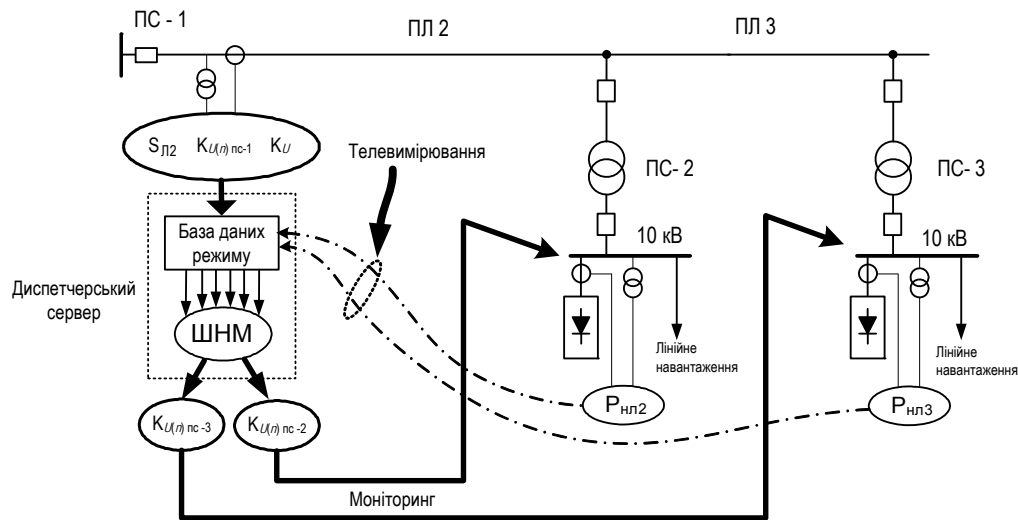


Рис. 2. Принципова схема організації моніторингу в досліджуваній електричній мережі

Навантаження перетворювачів тягової підстанції має імовірнісний характер і може часто змінюватись залежно від графіку руху потягів. Причому можливі режими роботи як з практично нульовим навантаженням перетворювачів, так і з близьким до номінального. Зміна режиму навантаження може відбуватись як поступово, так і стрибкоподібно (зупинка – старт потяга). Величина генерованих у мережу гармонік зростає пропорційно з ростом навантаження перетворювачів.

Підстанції у досліджуваній мережі забезпечені стандартними вимірними пристроями, включно з ватметрами, котрі стаціонарно встановлені на шинах 10 кВ підстанцій мережі та здійснюють вимірювання потужності на фідерах нелінійних споживачів. Ці підстанції не обладнано стаціонарними вимірними пристроями гармонік. У цій електричній мережі лише на ПС-1 по ПЛ-2 110 кВ передбачено встановлення стаціонарного пристрою для вимірювання показників несинусоїдного режиму. На ПС-1 є постійний черговий персонал електропостачальної компанії, що здійснює диспетчеризацію цієї ділянки електричної мережі. Диспетчер може спостерігати динаміку зміни навантаження підстанцій у часі за допомогою телевимірів. На рис. 3 наведено запропоновану структуру штучної нейронної мережі (ШНМ) системи моніторингу гармонік з врахуванням передачі наявних на підстанціях телевимірів до ПС-1.

Лінійне навантаження підстанцій електричної мережі змінюється згідно з добовим графіком споживання. Оскільки величина нелінійного навантаження має імовірнісний

характер, то немає чіткої відповідності між потужністю навантаження мережі та варіацією гармонік у мережі.

На підставі експериментальних досліджень для цієї нейронної мережі визначено мінімально необхідну кількість вхідних сигналів (вимірів) для забезпечення виконання поставленого завдання. При цьому врахована можливість отримання таких вимірів на підстанціях електричної мережі та їх передача на диспетчерський пункт ПС-1. Структура нейронної мережі прямого поширення містить лише один прихований шар. Кількість нейронів у цьому шарі прийнята рівною півсумі кількості вхідних та вихідних сигналів.

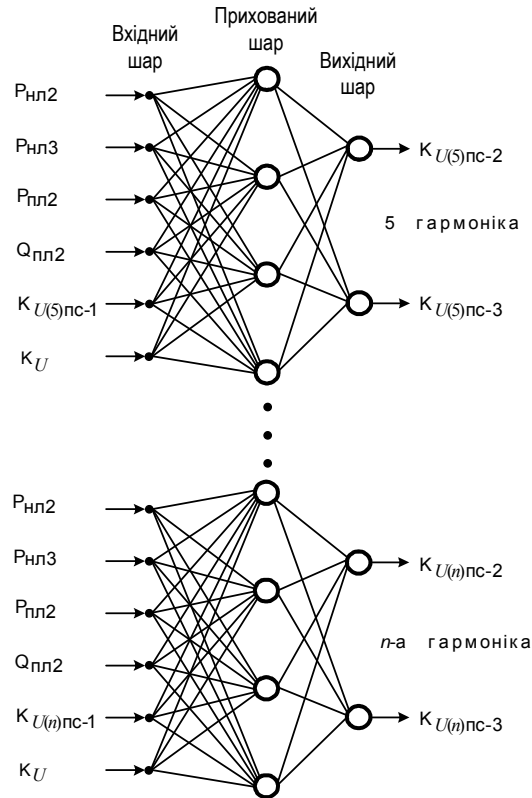


Рис. 3. Нейронна мережа моніторингу несинусоїдних режимів

Враховуючи вказані особливості, вибрано такі вхідні сигнали для нейронної мережі: активні потужності нелінійних навантажень на ПС-2 та ПС-3 ($P_{нл2}$, $P_{нл3}$), перетік потужності від ПС-1 по ПЛ-2 ($P_{пл2}$ і $Q_{пл2}$) та значення коефіцієнтів спотворення синусоїдності кривої напруги і n -ї гармонічної складової напруги ($K_{U(n)пс-1}$ і K_U) на шинах 110 кВ ПС-1. Усі дані надходять від стаціонарно встановлених на підстанціях мережі вимірних пристроїв.

Нейронну мережу створено за допомогою підпрограми NNTool з панелі інструментів Neural Network програмного комплексу MatLab. Для нейронів прихованого шару вибрано передавальну функцію у вигляді гіперболічного тангенса ($tansig$), що для змінної n обчислюється за формулою:

$$tansig(n) = \frac{2}{(1 + e^{-2n})} - 1. \quad (2)$$

Передавальною функцією нейронів вихідного шару вибрано функцію “проста лінія” ($pureline$), оскільки така функція може передавати будь-які значення в широкому діапазоні. Вагові коефіцієнти налаштовувались так, щоб мінімізувати повну квадратичну похибку між тренувальною множиною виходів та множиною реальних значень.

Для тренування нейронної мережі згідно з процедурою тренувального алгоритму “зворотного розповсюдження” використано функцію масштабного спряженого градієнта зі

зворотнім поширенням похибки (TRAINSCG – Scaled conjugate gradient).

Нейронну мережу тренувано для оцінювання коефіцієнтів n -ї гармонічної складової напруги на шинах 10 кВ ПС-2 та ПС-3 ($K_{U(n) \text{ пс-2}}$, $K_{U(n) \text{ пс-3}}$) даної електричної мережі. Як попередньо зазначено, внаслідок особливостей розрахунку гармонік, які дозволяють аналізувати електричну мережу окремо для кожної гармоніки, для покращення збіжності та збільшення інформаційної пам'яті нейронну мережу поділено на ряд паралельних мереж (окремо для кожної гармоніки) з однаковими входами та двома виходами кожна, як показано на рис. 3. Причому у цьому випадку враховувались лише гармоніки, характерні для нелінійних електроприймачів даної електричної мережі – 5-а, 7-а, 11-а тощо.

Вибору такої структури та алгоритмів тренування нейронної мережі передувала значна кількість досліджень можливих альтернатив: використання окремої нейронної мережі для одного виходу, різні типи доступних тренувальних функцій (зокрема, такі як TRAINGDM, TRAINGDA, TRAINGDX), різні комбінації вхідних параметрів режиму. Проте, як показали дослідження, вибраний варіант забезпечує найшвидшу збіжність ітераційного процесу та простоту реалізації.

Згідно з запропонованою концепцією архітектури інтелектуальної системи моніторингу для формування тренувальної множини даних вхід / вихід здійснено моделювання режимів аналізованої електричної мережі в часовій області засобами програмного комплексу MatLab, (підпрограма Simulink). У результаті розрахунків у миттєвих координатах отримані криві напруг для різних режимів навантажень, які у подальшому розкладаються в ряд Фур'є і розраховуються коефіцієнти спотворень напруги для заданого режиму роботи, який характеризується відповідними значеннями вибраних для нейронної мережі потужностей. Вибрана для моделювання множина режимів охоплювала можливий діапазон зміни та комбінації потужностей навантаження з певною дискретністю їх зміни. У табл. 1 наведено фрагмент множини тренувальних даних для нейронної мережі, яку зображено на рис. 3, який ілюструє принцип формування множини тренувальних даних. У цю таблицю також внесено тестову множину даних, які не ввійшли у тренувальну множину. Тестова множина даних використовується для перевірки роботи нейронної мережі.

На підставі отриманих таким чином множин вхідних та вихідних даних здійснено тренування відповідних нейронних мереж. У табл. 2 наведено фрагмент результатів тренування нейронної мережі. Тестування нейронної мережі відбувалося шляхом моніторингу “відомих джерел гармонік” в електричній мережі. Метою такого тестування є перевірка здатності нейронної мережі визначати стан електричної мережі за даними, котрі знаходилися у межах зміни вхідних параметрів, проте, внаслідок вибраної дискретності вибору цих параметрів, не ввійшли у навчальну множину.

Таблиця 1

Приклад множини тренувальних даних для 5-ї гармоніки

№ п/п	$P_{\text{пл}2}$, МВт	$P_{\text{пл}3}$, МВт	$S_{\text{пл}2}$, МВА	$K_{U(5) \text{ пс-1}}$, %	$K_{U(5) \text{ пс-2}}$, %	$K_{U(5) \text{ пс-3}}$, %	K_U , %
1	1	0	5,4+j1,6	0,09	1,34	0,12	0,56
2	3	0	7,2+j2,2	0,25	3,80	0,34	0,99
3	5	0	8,9+j2,9	0,41	6,30	0,56	1,46
4	7	0	10,5+j3,7	0,56	8,47	0,75	1,78
5	0	1	5,5+j1,6	0,09	0,11	1,31	0,90
6	0	3	7,3+j2,1	0,26	0,34	3,85	1,61
7	0	5	9,0+j2,8	0,43	0,55	6,23	2,23
8	0	7	10,7+j3,6	0,58	0,74	8,61	2,66
9	1	1	6,4+j1,8	0,17	1,41	1,50	1,04
10	3	1	8,2+j2,4	0,34	3,77	1,74	0,95
11	5	1	9,9+j3,1	0,49	6,11	2,01	1,91

Продовження табл. 1

№ п/п	$P_{пл2}$, МВт	$P_{пл3}$, МВт	$S_{пл2}$, МВА	$K_{U(5) пс-1}$, %	$K_{U(5) пс-2}$, %	$K_{U(5) пс-3}$, %	K_U , %
12	7	1	11,5+j3,8	0,62	8,21	1,93	1,54
·	·	·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·	·	·
21	1	7	11,6+j3,8	0,65	1,95	8,69	2,3
22	3	7	13,3+j4,5	0,82	4,52	8,94	2,11
23	5	7	15,0+j5,2	0,99	6,75	9,15	2,44
24	7	7	16,6+j6,0	1,13	8,80	9,28	3,53
Тестова множина							
25	2	5	10,8+j3,4	0,59	3,07	6,55	1,56
26	5	2	10,8+j3,4	0,58	6,14	3,21	1,71
27	4	6	13,3+j4,5	0,84	5,57	7,99	2,10
28	6	6	15,1+j5,3	0,97	7,15	7,68	2,22

Рядки 25 – 28 у табл. 2 відображають результати оцінювання джерел гармонік за даними тестової множини. Абсолютна похибка у табл. 2 обчислюється як різниця між дійсними значеннями, отриманими в результаті моделювання режимів роботи електричної мережі, та даними, отриманими в результаті тренування нейронної мережі.

Таблиця 2

Результати тренування нейронної мережі за множиною даних з табл. 1

№ п/п	Дійсні значення		Результати тренування		Абсолютна похибка	
	$K_{U(5) пс-2}$, %	$K_{U(5) пс-3}$, %	$K_{U(5) пс-2}$, %	$K_{U(5) пс-3}$, %	$\Delta K_{U(5) пс-2}$, %	$\Delta K_{U(5) пс-3}$, %
1	1,34	0,12	1,35	0,20	-0,01	-0,08
2	3,80	0,34	3,70	0,44	0,1	-0,1
3	6,30	0,56	6,17	0,65	0,13	-0,09
4	8,47	0,75	8,49	0,81	-0,02	-0,06
·	·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·	·
23	6,75	9,15	6,82	9,31	-0,07	-0,16
24	8,80	9,28	9,02	9,42	-0,22	-0,14
Результати для тестової множини						
25	3,07	6,55	2,92	6,60	0,15	-0,05
26	6,14	3,21	6,27	3,11	-0,13	0,1
27	5,57	7,99	5,60	8,05	-0,03	-0,06
28	7,15	7,68	7,19	7,85	-0,04	-0,17

Аналіз результатів тренування та тестування вказує на те, що вибрана структура нейронної мережі, множина вхідних даних та дискретність зміни тренувальних пар даних дозволяють забезпечити задовільну точність моніторингу показників несинусоїдності напруги на шинах підстанцій досліджуваної електричної мережі.

Висновки

1. У результаті досліджень запропоновано та обґрунтовано нову концепцію системи моніторингу несинусоїдних режимів електричних мереж на основі непрямих вимірювань параметрів режимів, що дозволяє суттєво зменшити застосування дорогих спеціалізованих приладів для контролю несинусоїдних режимів у електричних мережах.

2. Розроблено принципи побудови інтелектуальної системи моніторингу несинусоїдних режимів та спосіб її налагодження для електричних мереж зі змінними нелінійними навантаженнями. Вона дозволяє контролювати показники несинусоїдності режиму в заданих точках електричної мережі за даними одного чи кількох стаціонарних пристроїв

вимірювання гармонік та даними доступних на підстанціях електричної мережі вимірів (P, Q, U, I тощо).

3. Обґрунтовано тип нейронної мережі для розробленої системи моніторингу і спосіб вибору можливих вхідних та вихідних множин тренувальних даних. Обґрунтовано доцільність отримання множин тренувальних даних для налаштування нейронної мережі на основі моделювання характерних режимів електричної мережі.

4. На прикладі вибраного фрагменту електричної мережі з нелінійними навантаженнями показано практичний підхід до вибору структури та налагодження інтелектуальної системи моніторингу та підтверджено ефективність застосування розробленої структури нейронної мережі та методів її налагодження для моніторингу несинусоїдних режимів електричних мереж.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Manson J. , Targosz R. European Power Quality Survey Report. November 2008 // [Електронний ресурс] <http://www.leonardo-energy.org/european-power-quality-survey-report>. – 29с.
2. Roger C. Dugan. Electrical Power System Quality / Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, H. Wayne Beaty. – USA, 1996. – 265 p.
3. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
4. Najjar M., Heydt G. T., A hybrid nonlinear least squares estimation of harmonic signal levels in power systems // IEEE Trans. Power Delivery. – 1991. – vol. 6, no.1. – P. 282 – 288.
5. Farach J. E., Grady M. V., Arapostathis A. An optimal procedure placing sensors and estimating the locations of harmonic sources in power systems // IEEE Trans. Power Delivery. – 1993. – vol. 8, no.3. – P. 1303 – 1310.
6. Hong R. K., Chen Y. C. Application of algorithms and artificial-intelligence approach fo locating multiple harmonics in distributin systems // IEEE Trans. Industry Appl., – 1993. vol. 29, no.1. – P. 202 – 208.
7. Hartana R. K., Richards G. G. Constrained neural network-based identification of harmonic sources // EEE Trans. on Ind. Application. – 1993. – vol. 29, № 1. – P. 202 – 208.
8. Спосіб моніторингу вищих гармонік у розподільчій електричній мережі: Пат. 35180 України, МПК⁷ G01R 23/16/ Ю. О. Варецький, Т. І. Наконечний; – № u200802024; Заявл. 18.02.2008; Опубл. 10.09.2008, Бюл. № 17. – 4 с. іл.
9. Varetsky Y., Nakonechny T. Monitoring Harmonic Sources in Distribution System by Neural Network Estimator // Proc. of 9 Int. Conf. "Electric power quality and utilization". – Barcelona, 9-10 October, 2007. – [Електронний ресурс] [www.leonardo_energy.org/archive/all/2007 Paper 1219](http://www.leonardo_energy.org/archive/all/2007/Paper%201219), 4 P. 2007.

Варецький Юрій Омелянович – д. т. н., професор кафедри електричних систем та мереж, тел. 2753318, моб. 0509567540, e-mail: j.varetsky@gmail.com.

Наконечний Тарас Ігорович – аспірант кафедри електричних систем та мереж, тел. 2753318, моб. 0667802271, e-mail: 0taran0@gmail.com.

Федонюк Микола Дмитрович – аспірант кафедри електричних систем та мереж, тел. 2582500, моб. 0985225432, e-mail: kolyol@mail.ru.

Національний університет “Львівська політехніка”.

Комар Вячеслав Олександрович – к. т. н., доцент кафедри електричних станцій і систем, тел. 598377, e-mail: kvo76@mail.ru.

Вінницький національний технічний університет.