

Устойчивость электроэнергетических систем как задача нелинейной механики

Показано, что аналитические методы нелинейной механики, развитые в бывшем Советском Союзе в 30-х годах прошлого века, адекватны задаче устойчивости больших электроэнергетических объединений как существенно нелинейных динамических систем. Нелинейность основного уравнения динамики электроэнергетических систем – уравнения механического движения инерционных масс ротора агрегата турбина-генератор в сочетании с автоматическими регуляторами мощности турбины и возбуждения синхронного генератора приводит к образованию нелинейной неавтономной динамической системы. Н.М. Крылов и Н.Н. Боголюбов развили теорию усреднения, которая позволяет с заданной погрешностью находить аналитическое решение для нелинейной системы. Фактически этот же метод используют для численного интегрирования уравнений движения синхронных генераторов для анализа устойчивости ЭЭС, но он требует эффективной организации совместного решения системы дифференциальных и алгебраических уравнений, из которых состоит модель динамики ЭЭС. Имитационное моделирование, выполненное для реального режима ОЭС Украины, который был дополнительно утяжелен, показало, что при определенных условиях (например, ремонтный режим), в соответствии с предсказаниями теории нелинейных систем, малое возмущение может вызвать автоколебательный процесс в автоматически регулируемой динамической системе. Библ. 7, рис. 8.

Ключевые слова: устойчивость, электроэнергетическая система, нелинейная механика, имитационное моделирование.

V. M. Avramenko

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Stability of electric power systems as the task of nonlinear mechanics

It is showed that the analytical methods of nonlinear mechanics, developed in Soviet Union in 30th of the last century, are adequate the task of stability of large electric power pools as substantially nonlinear dynamic systems. Equation of mechanical motion of the rotor inertia masses of turbine and generator is basic equation of dynamics of the electric power system. Its non-linearity in combination with the automatic regulators of power of turbine and excitation of synchronous generator results in formation of the nonlinear nonautonomous dynamic system. N.M. Krylov, N.N. Bogolyubov developed the theory of doing middle, which allows with the set error to find an analytical decision for the nonlinear system. Actually the same method is used for numeral integration of motion equations of synchronous generators for the analysis of EPS stability, but it requires effective organization of joint decision of the system of differential and algebraic equations which form the model of EPS dynamics. Simulation, executed for the real mode of UPS of Ukraine, which was additionally made heavier, showed that at certain terms (for example, repair mode), in accordance with predictions of the nonlinear systems theory, small disturbances can cause an autooscillations in the automatically controlled dynamic system. References 7, figures 8.

Key words: stability, electric power system, nonlinear mechanics, simulation method.

Надійшла 26.12.2017

Received 26.12.2017

УДК 621.315.1

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ПЕРЕНАПРУГ У МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 750 кВ З НЕСИНУСОЇДАЛЬНИМ ДЖЕРЕЛОМ СПОТВОРЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

В.В. Кучанський, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,
e-mail: skilldur@ukr.net

Розглянуто резонансні перенапруги, що виникають внаслідок підключення автотрансформатора до електричної мережі. Проведено дослідження, присвячені актуальній науковій та практичній задачі – розробка моделей для аналізу резонансних перенапруг при їх виникненні, розвитку та існуванні. Розроблено штучну нейронну мережу контролю перенапруг та функціональні моделі для її налагодження. Досліджено застосування розробленої мережі для виявлення факторів, які мають найбільший вплив на появу та кратність перенапруг в електричній мережі.

чних мережах. Наявність значної кількості нечітко заданих чинників, які впливають на точність визначення характеристик даних перенапруг, зумовила необхідність використання штучної нейронної мережі. Обґрунтовано вибір алгоритму навчання багатощарового персептрона для вирішення задачі визначення характеристик перенапруг, що виникають при включенні лінії електропередачі надвисокої напруги на ненавантажений автотрансформатор. Було застосовано процедуру навчання методом зворотного поширення помилки, що придатна для навчання багатощарових нейронних мереж. Сформульовано вимоги до підготовки багатощарового персептрона для вирішення задачі визначення характеристик резонансних перенапруг. Такі вимоги пов'язані з вибором оптимальної архітектури багатощарового персептрона, підготовкою вибірок даних, кількістю епох навчання, вибором функції активації нейронів. Виявлено фактори, які найбільше впливають на характеристики резонансних перенапруг. Наведено результати визначення характеристик перенапруг такого класу за допомогою штучної нейронної мережі. Бібл. 11, рис. 5.

Ключові слова: резонансні перенапруги, несинусоїдальні режими, парні гармоніки, штучна нейронна мережа.

Причиною виникнення резонансних перенапруг є резонанс у нелінійному колі. Класифікація різноманітних форм резонансу була дана в класичних працях минулого сторіччя. Всі види резонансу можна об'єднати в наступному визначенні: резонанс – це періодичний (або квазіперіодичний) режим у коливальній системі, який характеризується різким зростанням амплітуди однієї або декількох гармонік коливання, і виникає за умови, що частота резонансної гармоніки близька до частоти діючої в системі змушуваної сили (або до її кратної частини). Відповідно існує чотири форми резонансу: лінійний, параметричний, нелінійний та авторезонанс.

На рис. 1 показано коливальний контур rLC з нелінійною індуктивністю L . Резонанс в контурі виникає під дією гармонічної напруги E .

Перехід до резонансного режиму на частоті джерела виникає стрибкоподібно, амплітуда коливань при малих значеннях r обмежена нелінійністю кола. Це нелінійний резонанс або ферорезонанс. Більш детальний аналіз показав, що стрибкоподібний перехід до резонансного режиму в нелінійному колі rLC здійснюється в результаті періодичної зміни параметра, в даному випадку нелінійної індуктивності L під дією періодичної зміни вимушеного струму, що протікає через L . Через це нелінійний резонанс на основній гармоніці називають ще автопараметричним резонансом.

Мета статті – дослідження застосовності штучної нейронної мережі для експрес-оцінки визначення характеристик резонансних перенапруг при включенні лінії електропередачі надвисокої напруги на ненавантажений автотрансформатор та проведення серії моделювань для визначення ступеня впливу параметрів електрообладнання на умови виникнення такого виду перенапруг.

Як зазначено в [2–5, 11], можливості натурних досліджень перенапруг шляхом прямих вимірювань обмежені, а їх результати, хоча й дуже важливі, відображають минулий досвід, через те що такі вимірювання можуть бути виконані тільки на вже побудованих діючих лініях електропередачі. Саме тому пріоритетним напрямком є виконання розрахунків, що прогнозують характеристики перенапруг завдяки імітаційному та математичному моделюванню несинусоїдальних режимів.

Для моделювання за допомогою штучної нейронної мережі (ШНМ) була прийнята гіпотеза про певний розвиток подій, яка потім знайшла підтвердження при порівнянні результатів досліджень з експериментальними даними. Необхідною умовою є відповідне резонансне налаштування лінії електропередачі надвисокої напруги (ЛЕП НВН) [1–5, 7, 11]. Процес виникнення резонансних перенапруг на другій гармонічній складовій у разі підключення автотрансформатора (АТ) розвивається таким чином: при підключенні малонавантаженого АТ виникають повільно затухаючі кидки струмів намагнічування з істотним вмістом вищих гармонік (серед яких домінуючою є друга), які викликані насиченням магнітопроводу. Таким чином, джерело струму (а не напруги, як помилково стверджується в [1, 7, 11]) вищих гармонік виявляється приєднаним до ЛЕП. Тому саме гармонічні складові струму включення АТ обумовлюють перенапруги на другій гармонічній складовій. У свою чергу, вищі гармонічні

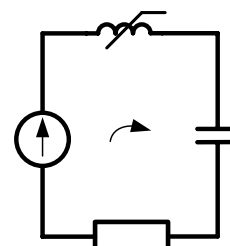


Рис. 1

струму АТ, що генеруються, спотворюють форму кривих напруги. І якщо з'єднання еквівалентного опору системи та ЛЕП має ємнісний характер щодо точки підключення магнітного шунта АТ, то в лінійній частині схеми посилюється друга гармоніка. Це збільшує насичення осердя, що в свою чергу призводить до збільшення вищих гармонічних складових. Таким чином, перенапруги на другій гармоніці зростають лавиноподібно через струми намагнічування АТ.

На рис. 2 представлені результати моделювання процесів на лінії Хмельницька АЕС – Жешув (Польща), які відбуваються при включенні ненавантаженого АТ. Форма кривих напруги може бути спотворена впродовж багатьох періодів (рис. 2). Таким чином, резонансні перенапруги на другій гармоніці досягають суттєвих величин і можуть бути тривалими (порядку декількох секунд) [1, 6, 7, 8–11], що призведе до пошкодження ізоляції устаткування. Саме тому всебічне дослідження і вивчення перенапруг на другій гармоніці є важливим науково-технічним завданням. Як видно з рис. 2, кратність перенапруг може перевищувати 1,5 з тривалістю дії 0,5–0,6 с.

Як видно з рис. 2, резонансні перенапруги в електричних мережах НВН можуть стати причиною розвитку важких аварій, тому що навіть при незначних амплітудних значеннях мають порівняно велику тривалість та викликають відмову релейного захисту від підвищення напруги. Задача дослідження перенапруг парної кратності ускладнюється через врахування кореляції, яка існує між багатьма нечітко заданими параметрами [2–5].

При моделюванні гармонічних перенапруг на другій гармоніці кожен окремо взятий чинник не може вважатись незалежним. Зміна одного параметра може призвести до зміни іншого, інакше кажучи, в даному випадку існує кореляція як між параметрами режиму конкретної мережі, так і параметрами її устаткування. Наявність цієї взаємозалежності не дає змоги отримати чіткі залежності, які могли б бути використані для аналізу перенапруг на другій гармоніці в магістральній електричній мережі, і в цьому випадку, як показує досвід наукових досліджень [2–3], ефективним засобом для моделювання таких невизначених систем є ШНМ.

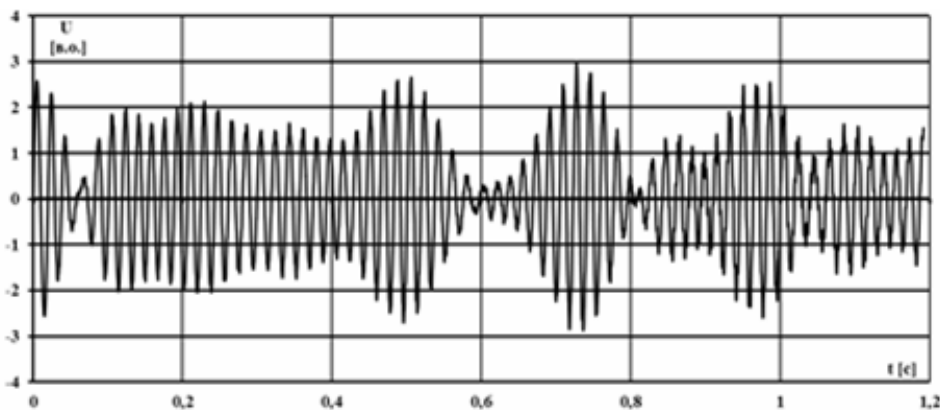


Рис. 2

Штучна нейронна мережа працює наступним чином. Нейрон отримує вхідні сигнали (вхідні дані або вхідні сигнали інших нейронів нейронної мережі) через кілька вхідних каналів. Кожен вхідний сигнал проходить через з'єднання, що має певну інтенсивність (або вагу); ця вага відповідає

синаптичній активності біологічного нейрона. З кожним нейроном пов'язане певне порогове значення вихідного сигналу. Далі обчислюється зважена сума входів, від неї віднімається граничне значення і в результаті виходить величина активації нейрона (вона також називається постсинаптичним потенціалом нейрона).

Важливу роль при моделюванні процесів з використанням ШНМ відіграє попередня підготовка моделі, яка полягає у використанні програмного інструментарію для вибору, навчання, тестування і використання ШНМ [11]. Зокрема, для вирішення поставленої в роботі задачі множиною вхідних даних $Input$ є: значення напруги джерела живлення $U_{ДЖ}$, час замикання полюсів вимикача δ , ємність фази ЛЕП НВН C_{ϕ} , нахил кривої намагнічування трансформатора L_{sat} і залишковий магнітний потік Φ_0 та довжина лінії l :

$$Input = \{\Phi_0, L_{sat}, C_{\phi}, \delta, U_{ДЖ}, l\}. \quad (1)$$

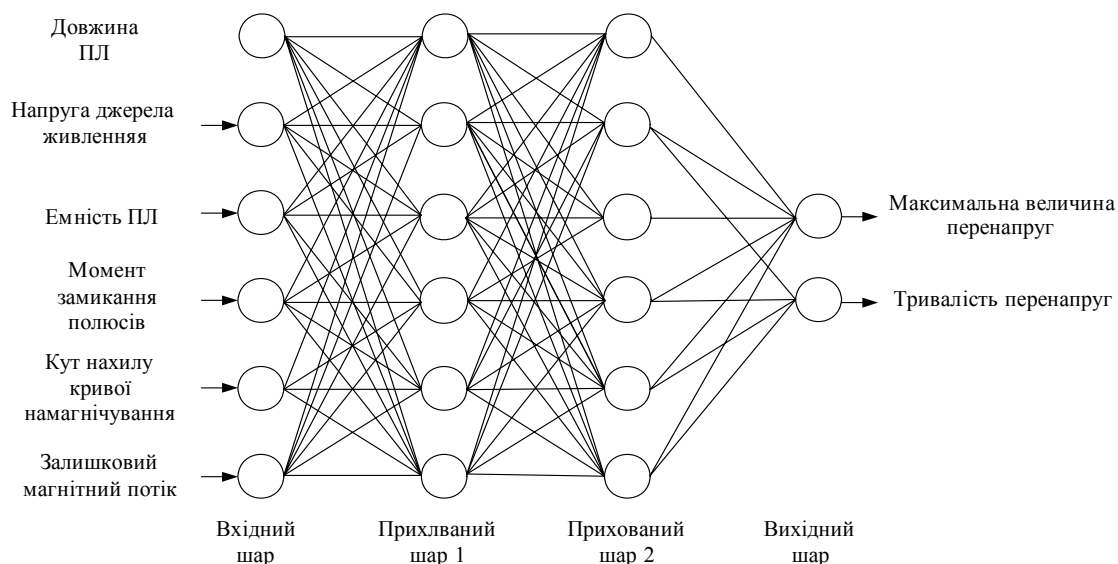


Рис. 3

Вибір структури ШНМ здійснюється відповідно до особливостей і складності завдання. Для вирішення деяких окремих типів завдань вже існують оптимальні конфігурації, описані, наприклад, в [6]. Якщо ж завдання не може бути зведене до жодного з відомих типів, розробнику доводиться вирішувати складну проблему синтезу нової конфігурації. При цьому він керується кількома основними принципами: можливості мережі зростають зі збільшенням числа комірок мережі, щільності зв'язків між ними і числом виділених шарів (вплив числа шарів на здатність мережі виконувати визначення характеристик перенапруг показано на рис. 3 з [6, 8–10]); введення зворотних зв'язків поряд зі збільшенням можливостей мережі піднімає питання про динамічну стійкість мережі; складність алгоритмів функціонування мережі (у тому числі, наприклад, введення декількох типів синапсів – збуджувальних, гальмівних та ін.) також сприяє посиленню продуктивності мережі. Питання про необхідні та достатні властивості мережі для вирішення того чи іншого роду завдань являє собою цілий напрям нейрокомп'ютерної науки. Оскільки проблема синтезу штучних мереж надто залежить від розв'язуваної задачі, дати загальні докладні рекомендації важко. У більшості випадків оптимальний варіант виходить на основі інтуїтивного підбору

На вхід нейронної мережі подається шість значень – дані з (1), на виході отримуємо максимальні величини та тривалість перенапруг. У ході експериментального підбору характеристик мережі два приховані шари мають містити шість нейронів.

При виборі та підготовці ШНМ для розв'язання завдань другого етапу моделювання був використаний універсальний програмний інструментарій Neural Network Toolbox (NNT), який входить у стандартну поставку пакета Matlab. Інструментарій NNT надає можливість редагування та модифікації ШНМ, а також забезпечує програмну підтримку необхідних типів ШНМ, алгоритми їх навчання та адаптації [6, 8-10]. Запропонований підхід до формування вибірок вхідних сигналів, а також використання NNT в якості програмного інструментарію забезпечує ефективну підготовку ШНМ для вирішення задачі моделювання внутрішніх резонансних перенапруг в магістральній електричній мережі.

У роботі в якості алгоритму навчання пропонується метод Левенберга-Марквардта. Цей алгоритм на відміну від класичного алгоритму навчання застосовує навчання за епохами [8–11]. У цьому випадку помилка навчання розраховується за всю епоху навчання та параметри мережі змінюються, коли мережі вже подані усі елементи навчальної множини.

Для успішного функціонування ШНМ важливим фактором є попередня підготовка, яка полягає у виборі правильного методу навчання. Для навчання ШНМ був обраний метод зворотного поширення похибки [6, 8–10], який широко застосовується для вирішення такого роду задач. На рис. 4 представлено кероване навчання ШНМ для кожного з вхідних сигналів

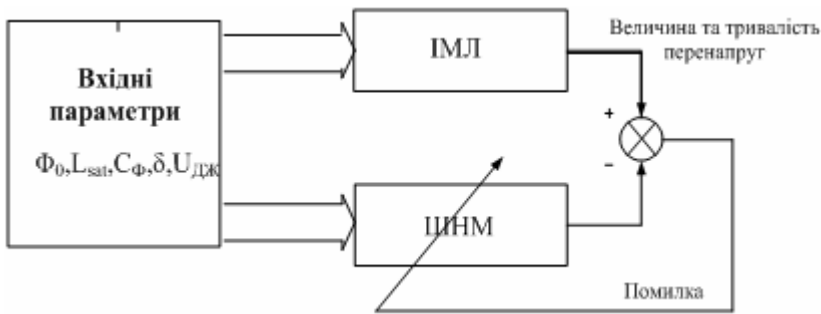


Рис. 4

з метою моделювання внутрішніх резонансних перенапруг у магістральній електричній мережі. Для навчання ШНМ застосовується імітаційна модель довгої лінії (ІМЛ).

Працездатність ШНМ перевіряється на тестовій вибірці, яка складається зі

значень, що не брали участі в навчанні ШНМ. Якщо ШНМ визначає тривалість і значення максимальних перенапруг із тестової вибірки, то підготовка ШНМ завершена, якщо ні – то проводиться повторна підготовка ШНМ.

Алгоритм Левенберга-Марквардта призначений для оптимізації параметрів нелінійних регресійних моделей. Передбачається, що в якості критерію оптимізації використовується середньоквадратична помилка моделі на навчальній вибірці. Алгоритм полягає в послідовному наближенні заданих початкових значень параметрів до шуканого локального оптимуму.

Задана навчальна вибірка – безліч пар вільної змінної $x \in X^M$ (входи мережі) і залежної змінної $y \in Y^M$. Задана функціональна залежність, яка була регресійною моделлю $y = f(w, x_n)$, безперервно диференціюється в області WX . Параметр w є вектором вагових коефіцієнтів. Потрібно знайти таке значення вектора w , яке б приносило локальний мінімум функції помилки

$$E_D = \sum_{n=1}^N (y_n - f(w, x_n))^2 \quad (2)$$

Перед початком роботи алгоритму задається початковий вектор вагових коефіцієнтів w . На кожному кроці ітерації цей вектор замінюється на вектор $w + \Delta w$.

Для оцінки приросту Δw використовується лінійне наближення функції $f(w + \Delta w, x) \approx f(w, x) + J\Delta w$, де J – якобіан функції $f(w, x)$ в точці w .

Матрицю J наочно можна представити у вигляді

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(w, x_1)}{\partial w_1} & \dots & \frac{\partial f(w, x_1)}{\partial w_R} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f(w, x_N)}{\partial w_1} & \dots & \frac{\partial f(w, x_N)}{\partial w_R} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Тут вектор вагових коефіцієнтів $w = [w_1, \dots, w_R]^T$.

Приріст Δw у точці w , що відповідає мінімуму E_D , дорівнює нулю. Тому для знаходження подальшого збільшення Δw прирівнюємо нулю вектор часткових похідних E_D по w . Для цього (2) запишемо у вигляді

$$E_D = |y - f(w + \Delta w)|^2, \quad (4)$$

де $f(w + \Delta w) = [f(w + \Delta w, x_1), \dots, f(w + \Delta w, x_N)]^T$.

Перетворюючи і диференціюючи цей вираз

$$|y - f(w + \Delta w)|^2 = (y - f(w + \Delta w))^T (y - f(w + \Delta w)) = f^T(w + \Delta w)f(w) - 2y^T f(w + \Delta w) + y^T y,$$

отримуємо $\frac{\partial E_D}{\partial w} = (J^T J)\Delta w - J^T (y - f(w)) = 0$. Таким чином, щоб знайти значення Δw , потрібно

вирішити систему лінійних рівнянь $\Delta w = (J^T J)^{-1} J^T (y - f(w))$.

Оскільки число обумовленості матриці $J^T J$ є квадрат числа обумовленості матриці J , то матриця $J^T J$ може виявитися істотно виродженою. Тому Марквардтом введений параметр регуляризації $\lambda \geq 0$.

1. $\Delta w = (J^T J + \lambda I)^{-1} J^T (y - f(w))$, де I – одинична матриця. Цей параметр призначається на кожній ітерації алгоритму. Якщо значення помилки E_D зменшується швидко, мале значення λ зводить цей алгоритм до алгоритму Гауса-Ньютона.

2. Алгоритм зупиняється в тому випадку, якщо приріст Δw у подальшій ітерації менше заданого значення, або якщо вектор вагових коефіцієнтів доставляє помилку E_D , меншу заданої величини, або якщо вичерпано число циклів навчання ШНМ. Значення вектора w на останній ітерації вважається потрібним.

Тестування нейронної мережі проводиться з використанням прикладів тестової вибірки. За результатами тестування оцінюється помилка роботи нейромережевої моделі. Етапи налаштування параметрів нейронної мережі та алгоритму її навчання нейронної мережі можуть виконуватися в циклі неодноразово доти, поки не буде отримана налаштована нейронна мережа, за допомогою якої можна вирішувати завдання з необхідним рівнем помилки.

Навіть у разі успішного, на перший погляд, навчання мережа не завжди навчається саме тому, чого від неї хотів дослідник. Тестування якості навчання нейромережі необхідно проводити на прикладах, які не брали участі в її навчанні. При цьому число тестових прикладів має бути тим більше, чим вище якість навчання. Якщо помилки нейронної мережі мають можливість близьку до однієї мільярдної, то і для підтвердження цієї ймовірності потрібен мільярд тестових прикладів. Виходить, що тестування добре навчених нейронних мереж стає дуже складним завданням.

На рис. 5 показані результати роботи ІМЛ та ШНМ. Для перевірки ефективності роботи розробленої штучної нейронної мережі були проведені розрахунки визначення величини перенапруг при зміні кута вмикання δ (рис. 5 а) та довжини лінії l (рис. 5 б). Різниця в результатах досягає приблизно 5 %. Завдяки результатам по виявленню ступеня впливу кута вмикання δ може бути розроблений дієвий захід по запобіганню виникненню перенапруг [3–5, 7].

Навчена і протестована нейронна мережа використовується для практичного вирішення завдання по мірі надходження нових вихідних даних (значень входних змінних). Результати по навченій мережі можуть бути отримані практично миттєво й інтерпретовані користувачем для подальшого прийняття рішень.

Висновки. Проведені дослідження застосовності штучної нейронної мережі дають можливість проводити експрес-оцінку визначення характеристик перенапруг, що виникають при несинусоїдальному джерелі спотворення з необхідним для практики ступенем точності. Вперше було визначено вимоги до підготовки штучної нейронної мережі архітектури багатошарового перцептрона для вирішення поставленої задачі. Щоб нейронна мережа мо-

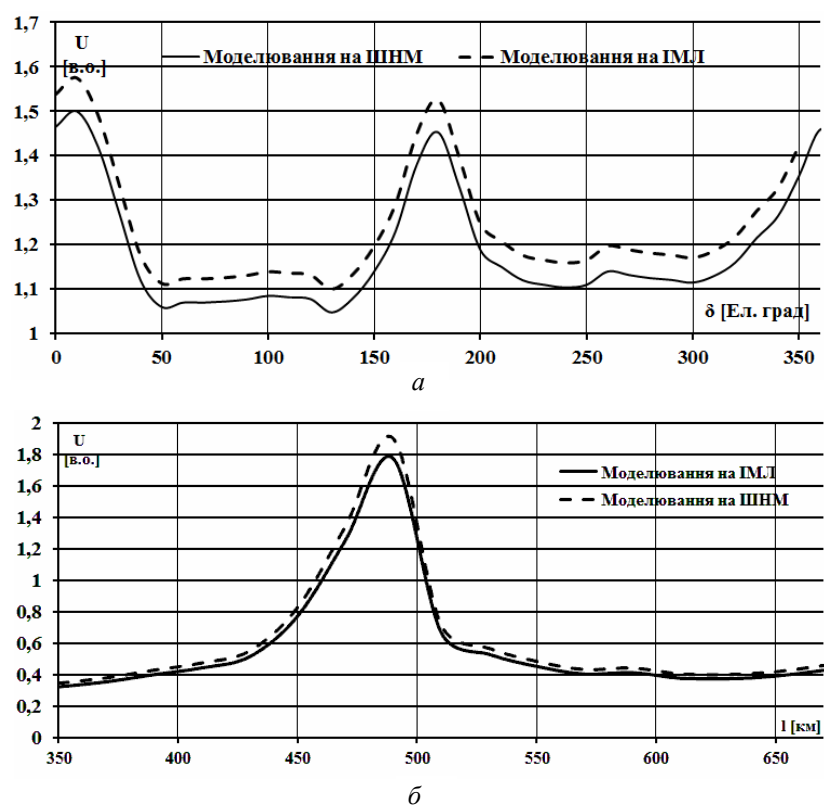


Рис. 5

гла виконувати необхідні функції, був обраний метод Левенберга-Марквардта з метою отримання прийнятної похибки. За допомогою досліджень на розробленій штучній нейронній мережі будуть підготовлені рекомендації для виконання процедури керованої комутації за кутом вмикання вимикача δ , які мають на меті запобігти резонансним перенапругам.

1. Базуткин В.В., Дмоховская Л.Ф. Расчеты переходных процессов и перенапряжений. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 328 с.
2. Дмоховская Л.Ф. Инженерные расчеты внутренних перенапряжений в электропередачах. Москва: Энергия, 1972. 288 с.
3. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Кучанський В.В., Шполянський О.Г. Дослідження резонансних перенапруг на ультрагармоніках парної кратності на ЛЕП 750 кВ. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2012. Вип. 29. С. 15–22.
4. Кузнецов В.Г., Шполянський О.Г. Исследование возможности возникновения перенапряжений в ЛЭП 750 кВ на 2-й гармонике. *Problemy Electroenergetyki: VI Miedzynarodowe Seminarium Polsko-Ukrainskie*, Lodz, 16-17 Spt. 2010. С. 51–58.
5. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И., Кучанский В.В. Использование искусственной нейронной сети для анализа резонансных перенапряжений. *Problemy Electroenergetyki: VI Miedzynarodowe Seminarium Polsko-Ukrainskie*, Lodz, 16-17 Spt. 2010. С. 81–88.
6. David Kriesel. Brief Introduction to Neural Networks. Berlin, 2010. P. 286.
7. Kuchanskiy V. The application of controlled switching device for prevention resonance overvoltages in nonsinusoidal modes. IEEE 37th International Conference on *Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2017, April. P. 394–399.
8. Sadeghkhan I., Ketabi A., Feuillet R. New approach to harmonic overvoltages reduction during transformer energization via controlled switching. Proceedings of in Proc. 15th International Conference on *Intelligent System Applications to Power Systems*, Curitiba, Brazil, 2009. P. 1589–1595.
9. Sadeghkhan I., Mortazavian A., Moallem M. Mitigation of capacitor banks switching overvoltages using radial basis function technique. *Advances in Electrical Engineering Systems* 13. Vol. 1, No. 1. March 2012. P. 8–13.
10. Sadeghkhan I., Ketabi A., Feuillet R. Estimation of Temporary Overvoltages during Power System Restoration using Artificial Neural Network. *IEEE Trans. Power Delivery*. Vol. 17, Oct. 2002. P. 1121–1127.
11. Tugay Y. The resonance overvoltages in EHV network. Proceedings of IEEE Sponsored Conference EPQU'09 – International Conference on *Electrical Power Quality and Utilisation*, Poland, Lodz, September 15-17, 2009. P. 14–18.

УДК 621.315.1

В.В. Кучанський, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна

Исследование резонансных перенапряжений в магистральных электрических сетях 750 кВ с несинусоидальным источником искажения с помощью искусственной нейронной сети

Рассмотрена возможность использования искусственных нейронных сетей для быстрого принятия решений в случае возникновения длительных перенапряжений. Проведен анализ специфики задачи разработки экспресс-метода определения характеристик перенапряжений и распространенных методов их решения с помощью применения искусственных нейронных сетей. Применена архитектура искусственных многослойных нейронных сетей, пригодных для реализации этой задачи. Рассмотрены резонансные перенапряжения, возникающие вследствие подключения автотрансформатора к электрической магистральной сети 750 кВ. Наличие значительного количества нечетко заданных факторов, которые влияют на точность определения характеристик данных перенапряжений, обусловила необходимость использования искусственной нейронной сети. Проведены исследования, посвященные актуальной научной и практической задаче – разработке нейромодели для анализа резонансных перенапряжений при их возникновении, развитии и существовании. Разработана искусственная нейронная сеть для определения кратности перенапряжений. Исследовано применение разработанной сети для выявления факторов, которые оказывают наибольшее влияние на появление и кратность перенапряжений в электрических сетях. Выявлены факторы, которые больше всего влияют на характеристики резонансных перенапряжений. Приведены результаты определения характеристик перенапряжений с помощью искусственной нейронной сети. Для решения задачи определения характеристик перенапряжений рассмотрены нейросетевые методы, которые отличаются способностью устанавливать нелинейные связи между параметрами линии электропередачи сверхвысокого напряжения. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи: осуществить определения характеристик перенапряжений нейросетевыми методами; построить модель нейронной сети, соответствующую исходным данным линии электропередачи; получить результаты прогноза; оценить точность функционирования построенной модели. Библ. 11, рис. 5.

Ключевые слова: резонансные перенапряжения, несинусоидальные режимы, четные гармоники, искусственная нейронная сеть.

V.V. Kuchanskyi

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

Investigation of resonance overvoltages in 750 kV main power electrical networks with non-sinusoidal source of distortion by using the artificial neural network

Considers the possibility of using artificial neural networks for rapid decision-making in the event of prolonged overvoltages. The analysis of the specifics of the task of developing an express method for determining the characteristics of overvoltages and common methods for their solution through the use of artificial neural networks is carried out. The architecture of artificial multilayer neural networks, suitable for the realization of this task, has been applied. The resonant overvoltages arising from the connection of the autotransformer to the electrical network 750 kV are considered. The research was devoted to the actual scientific and practical task - the development of models for the analysis of resonance overvoltages. An artificial neural network of overvoltage control its debugging has been developed. The application of the developed network for the identification of factors that have the greatest influence on the appearance and multiplicity of overvoltages in electrical networks is explored. The presence of a large number of fuzzy factors that affect the accuracy of the determination of the characteristics of overvoltage data necessitated the use of an artificial neural network. The factors that influence the characteristics of abnormal overvoltages are revealed. The results of determination of overvoltage characteristics of such a class by artificial neural network are given. The results of determining the characteristics of overvoltages using an artificial neural network are given. In this paper, to solve the problem of determining the characteristics of overvoltages, neural network methods are considered that differ in their ability to establish nonlinear connections between the parameters of the extra-high voltage transmission line. To achieve this goal, the following tasks were formulated: to carry out the definitions of overvoltage characteristics by neural network methods; to build a model of the neural network, corresponding to the initial data of the transmission line; get the results of the forecast; to estimate the accuracy of the functioning of the constructed model. References 11, figures 5.

Key words: resonance overvoltages, even harmonics, nonsinusoidal modes, artificial neuron network.

Надійшла 17.01.2018

Received 17.01.2018

УДК 621.316.5

НОРМАТИВНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОНІТОРИНГУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

М.Ф. Сопель¹, докт. техн. наук, **А.В. Панов²**, **В.І. Паньків³**, **Є.М. Танкевич⁴**, докт. техн. наук

1 – МПП «АНІГЕР»,

вул. Гарматна, 2, Київ, 03680, Україна

2–4 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

e-mail: av-panov@ukr.net

Виконано аналіз основних вимог нормативних документів ОЕС України, стандартів Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК), Американського національного інституту стандартів (ANSI) та Інституту інженерів-електриків (ІЕЕЕ) щодо високовольтних вимикачів у частині, що стосується їх номінальних значень, експлуатаційних характеристик, вибору та застосування систем моніторингу, дослідження, аналізу і звітності про відмови. Показано актуальність та значимість оновлення і гармонізації нормативного забезпечення високовольтних вимикачів та їх моніторингу з міжнародними стандартами. Бібл. 24, таблиця.

Ключові слова: нормативне забезпечення, вимикач, моніторинг, оновлення, розроблення, відмова, звітність.

Актуалізація, розроблення і оновлення нормативних документів (НД) ОЕС України та їх гармонізація з міжнародними стандартами визначені в документах Міненерговугілля України [8-10] основним напрямком реалізації технічної політики (ТП) в галузі. Там же зазначено, що впровадження НД дасть змогу підвищити надійність та ефективність експлуатації електроенергетичних об'єктів (ЕЕО) і енергосистем (ЕЕС), вдосконалити їх моніторинг і підвищити керованість ними, забезпечивши таким чином стійке функціонування і розвиток електроенергетики країни.