

ко А.М. VHDL для проектування обчислювальних пристроїв. – К.: ПП “Корнійчук”, ТОВ “ТВД ДС”, 2003. – 208 с. 4. Бойко А.С., Мороз В.І. Перспективи застосування програмованих логічних інтегральних схем у цифрових системах керування електроприводами // Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів: Матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнародною участю: В 2 ч. – Миколаїв: НУК, 2005. – С. 35–40.

УДК 621.316.761.2

Ю.О. Варецький, Т.І. Наконечний
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕСМ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВПЛИВУ КОМПЕНСУВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ НА НЕСИНУСОЇДНИЙ РЕЖИМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

© Варецький Ю.О., Наконечний Т.І., 2009

Запропоновано принцип побудови системи ідентифікації впливу компенсувальних засобів на несинусоїдний режим електричної мережі. Показана можливість створення такої системи ідентифікації на базі штучної нейронної мережі і даних вимірювань показників несинусоїдності, які здійснюються на головній підстанції магістральної електричної мережі.

A method is proposed for development of intelligent system for identification of compensating devices effect on non-sinusoidal electrical network behavior. Has been shown the feasibility of the identification system development by an artificial neural network and by harmonic index data measured on the main electrical network substation bus.

Проблема. В умовах сучасного енергоринку, коли все актуальнішою стає проблема якості електроенергії в електричних мережах, електропостачальні компанії вимушені здійснювати контроль впливу окремих споживачів на несинусоїдний режим мережі. Застосовуючи енергоощадні технології у промисловості, транспорті, комунальній сфері, споживачі електроенергії все частіше впроваджують системи керованого електропостачання, котрі, як правило, побудовані на різноманітних схемах з напівпровідниковими пристроями. З іншого боку, тарифна політика в електроенергетиці стимулює застосування конденсаторних батарей для компенсації реактивної потужності в електричних мережах. Ці обидві обставини істотно погіршують показники несинусоїдного режиму мережі внаслідок можливих резонансних підсилень окремих гармонік струму. Шляхом проведення відповідних епізодичних вимірювань електропостачальні компанії починають самостійно оцінювати якість електроенергії в окремих найбільш критичних вузлах електричної мережі, проте, внаслідок постійних змін конфігурації мережі та режимів навантажень і дуже низьку облаштованість мереж спеціалізованими пристроями вимірювання показників якості електроенергії, ефективність такого контролю залишається вкрай низькою. Тому необхідність розроблення ефективних засобів моніторингу несинусоїдних режимів в таких мережах є важливим завданням.

Аналіз останніх досліджень. Як відомо, вимірювання гармонік в електричній мережі вимагає встановлення спеціальних вимірних пристроїв, широке застосування яких стримується значною вартістю. Це погіршує можливості чергового диспетчера електропостачальної компанії здійснювати оцінку несинусоїдності напруги у контрольних точках і вживати можливі заходи з їх нормалізації.

Певні методи оцінювання джерел вищих гармонік в умовах неповного обладнання мережі засобами вимірювання, які базуються на традиційних підходах, були запропоновані у роботах [1, 2]. З іншого боку, деякі підходи, які використовують методологію штучних нейронних мереж для визначення характеристик джерел гармонік в електричній мережі, запропоновано у роботах [3, 4]. У роботах [5, 6] запропоновано структуру нейронної мережі для визначення показників несинусоїдності режиму в магістральній електричній мережі з нелінійними споживачами, яка обладнана тільки одним стаціонарним аналізатором гармонік. Проте, коли в окремих вузлах електричної мережі вмикають конденсаторні батареї чи фільтри вищих гармонік, може істотно збільшуватися похибка оцінки, що потребуватиме додаткової зміни структури нейронної мережі.

Завдання дослідження. У пропонуваній статті розглянуто інтелектуальну систему ідентифікації, побудовану на штучних нейронних мережах, яка дозволяє здійснювати постійний контроль впливу компенсувальних пристроїв на рівень гармонік у магістральній електричній мережі, яка обладнана стаціонарним аналізатором гармонік тільки на головній ділянці. Запропонований авторами підхід дає змогу надійно ідентифікувати компенсувальні пристрої в електричній мережі.

Опис електричної мережі. Однолінійна схема досліджуваної електричної мережі 110 кВ зображена на рис. 1. До складу електричної мережі входить дві підстанції (П2 та П3), живлення цієї мережі здійснюється від шин 110 кВ понижувальної підстанції (П1). Нелінійним навантаженням мережі є некеровані перетворювачі, під'єднані до шин 10 кВ на П-2 та П-3.

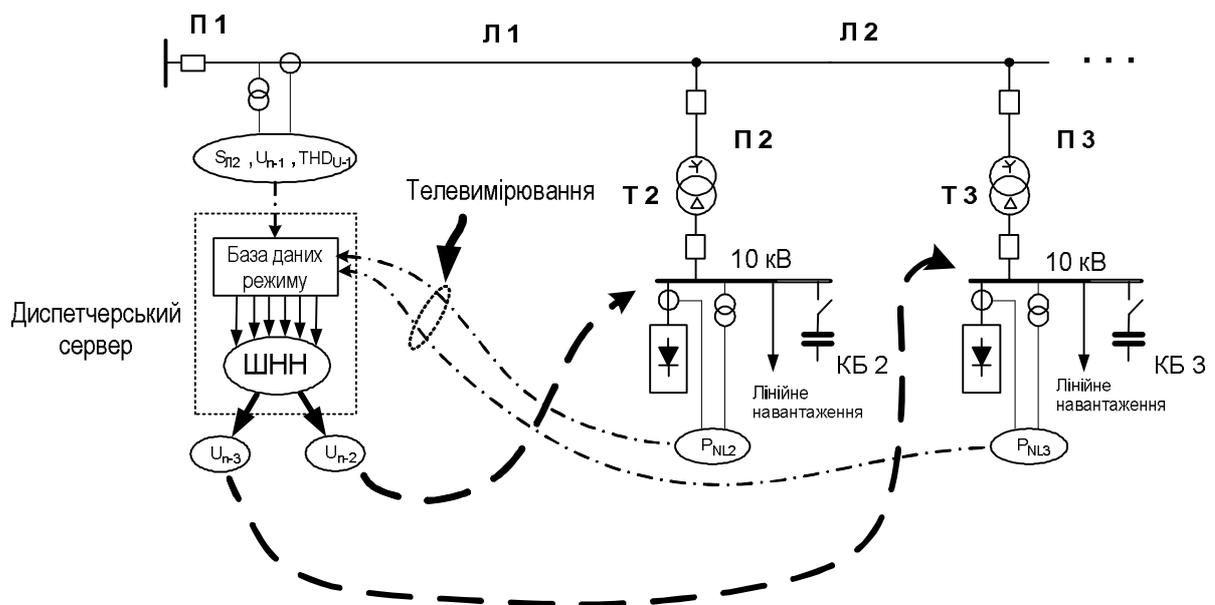


Рис. 1. Принципова схема досліджуваної електричної мережі

Ці перетворювачі є джерелами вищих гармонік у мережі. До шин підстанції під'єднано конденсаторні батареї КБ2 та КБ3, які вмикають чи вимикають згідно зі змінами навантаження підстанції. Крім того, від шин цих підстанцій також отримує живлення лінійне навантаження. Навантаження підстанцій може змінюватися в межах, наведених у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристика навантажень

Назва ПС	Максимальне лінійне навантаження, МВ·А	Навантаження перетворювачів, МВт
ПС-1	$(3,5 + j1,5)$	0
ПС-2	$(3,0 + j1,2)$	0...7
ПС-3	$(1,6 + j0,8)$	0...7

На підстанціях досліджуваної мережі встановлено стандартні вимірні пристрої включно з ват- і варметрами. У цій електричній мережі лише на підстанції П1 встановлено стаціонарний пристрій вимірювання показників несинусоїдного режиму. Диспетчер може спостерігати динаміку змін навантаження підстанцій у часі за допомогою телевимірів. Лінійне навантаження підстанцій змінюється за добовою характеристикою споживання електричної мережі. Величина нелінійного навантаження має випадковий характер і змінюється залежно від потреб виробництва. Тому немає чіткої відповідності між потужністю системи і варіацією гармонік у мережі. Зі зміною навантаження підстанції відбувається ввімкнення і вимкнення конденсаторних батарей на підстанціях мережі. Це істотно впливає на характер несинусоїдності режиму електричної мережі. В деяких випадках, з вмиканням конденсаторної може спостерігатися значне погіршення несинусоїдності режиму.

Моніторинг несинусоїдності режиму електричної мережі. Для оцінки рівня гармонік в описаній електричній мережі на основі штучної нейронної мережі (ШНН) розроблена система моніторингу, принцип перетворення сигналів якої показано на рис.1 штрих-пунктирними та пунктирними лініями. Принципи розробки, налаштування та функціонування цієї системи описано в [5, 6]. Вхідними сигналами нейронної мережі цієї системи є потужності $P_{нл2}$, $P_{нл3}$, які надходять через канали телевимірювання, а також величини, які отримують від стаціонарно встановлених на підстанції вимірних пристроїв: повна потужність на початку лінії Л1 – $P_{л1} + jQ_{л1}$, гармоніки напруги U_{n-1} і коефіцієнт несинусоїдності THD_U . Структура нейронної мережі наведена на рис. 2.

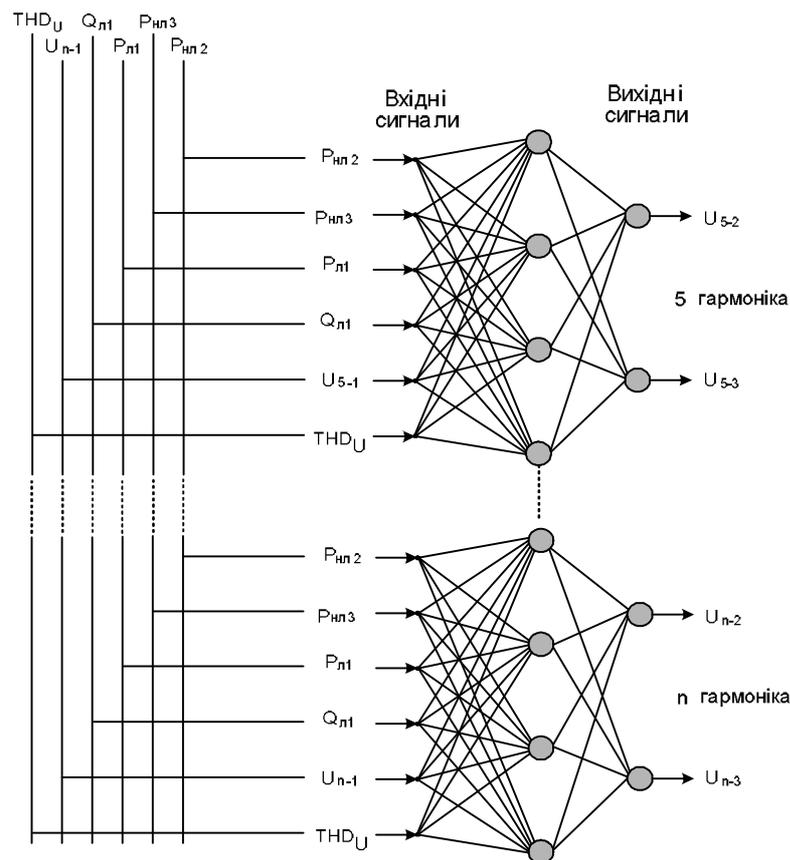


Рис. 2. Нейронна мережа для моніторингу гармонік напруги на підстанціях П2 та П3

Нейронну мережу було налаштовано для оцінювання гармонік напруги (U_{n-2} , U_{n-3}) на шинах 10 кВ підстанцій П2 та П3 електричної мережі. У цій роботі тренувальну множину даних отримано в результаті моделювання певного дискретного набору режимів електричної мережі та нелінійних

навантажень, який охоплював можливі межі їх зміни. Моделювання електричної мережі проводилось засобами програмного забезпечення MatLab для різних режимів навантажень у трифазній еквівалентній схемі. У результаті розрахунку, значення амплітуд гармонік у цих режимах отримано з розкладу в ряд Фур'є розрахованих миттєвих значень координат режимів.

Для створення тренувальної множини нейронної мережі комбінації значень потужностей нелінійних навантажень $P_{нл2}$, $P_{нл3}$ вибрано з дискретністю 2 МВт і в результаті моделювання отримувалися відповідні показники спотворення кривої напруги – U_{n-1} , $THDU$, U_{n-2} , U_{n-3} . Для оцінки точності нейронних оцінок гармонік напруги на шинах 10 кВ підстанцій П2 та П3 (відповідно, U_{n-2} та U_{n-3}) було вибрано тестову множину даних, яка не входила у тренувальну множину і також отримана шляхом моделювання певних проміжних режимів роботи електричної мережі.

Система ідентифікації впливу компенсувальних пристроїв на режим електричної мережі. Якщо нейронні мережі використовуються для знаходження кількісних величин, то точність обмежується неточною природою вхідних-вихідних зв'язків і помилкою квантування бінарних виходів нейронної мережі. Однак, певну частину вхідних-вихідних зв'язків можна точно і легко підрахувати. Під час ідентифікації джерел гармонік чи зміни їх характеристик результати вимірювання від постійного встановлених пристроїв у одному чи двох місцях електричної мережі хоч і не є достатніми, щоб повністю визначити характеристики всіх джерел гармонік, проте вони функційно пов'язані з цими джерелами і можуть бути уточненнями нейронних оцінок. Отже, нейронні оцінки можуть бути вдосконалені за допомогою мінімальної зміни так, щоб узгодити їх з будь-якими результатами доступних прямих вимірювань гармонік. Покажемо на прикладі гармонік струмів мережі загальний підхід до формулювання задачі аналізу.

Визначимо похибку E_r між нейронними оцінками з обмеженнями і без них як середньо-квадратичне значення різниці:

$$E_r = \sqrt{\frac{1}{n} (\mathbf{I}_h - \mathbf{I}_{hc})^{*T} \mathbf{W} (\mathbf{I}_h - \mathbf{I}_{hc})}, \quad (1)$$

де верхні індекси $*$ і T означають спряжену і транспоновану матрицю, відповідно; \mathbf{I}_h – вектор струмів n джерел гармонік, отриманих в результаті оцінки нейронною мережею; \mathbf{W} – діагональна матриця ваг, яка залежить від відносної надійності нейронних оцінок; \mathbf{I}_{hc} – вектор n нейронних оцінок з обмеженнями, внесеними m вимірними струмами гармонік, які мінімізують E_r . Ці обмеження, встановлюють зв'язок m вимірних струмів з n джерелами гармонік ($n > m$):

$$\mathbf{J}_{hm} = \mathbf{G} \mathbf{I}_{hc}, \quad (2)$$

де \mathbf{J}_{hm} – вектор m вимірних струмів, \mathbf{G} – матриця вимірювань розміром $(m \times n)$ з елементами, які є функціями опорів системи на відповідних гармоніках.

Оскільки вектор струмів \mathbf{I}_{hc} визначатиметься через частину відомих (вимірних) величин, то його розділимо на вектори m залежних і $(n-m)$ незалежних змінних:

$$\mathbf{I}_{hc} = (\mathbf{I}_{hc1}, \mathbf{I}_{hc2}). \quad (3)$$

Матрицю вимірювань \mathbf{G} також можна розділити на відповідні частини:

$$\mathbf{G} = [\mathbf{G}_1 \quad \mathbf{G}_2], \quad (4)$$

де \mathbf{G}_1 – матриця розміром $m \times m$ і \mathbf{G}_2 – матриця розміром $m \times (n-m)$.

Залежні змінні \mathbf{I}_{hc1} можуть бути обчислені за незалежними змінними \mathbf{I}_{hc2} і вектором вимірних струмів гармонік \mathbf{J}_{hm} , використовуючи співвідношення (2):

$$\mathbf{I}_{hc1} = \mathbf{G}_1^{-1} \mathbf{J}_{hm} - \mathbf{G}_1^{-1} \mathbf{G}_2 \mathbf{I}_{hc2}, \quad (5)$$

Це означає, що нейронну оцінку вектора \mathbf{I}_{hc} можна сформулювати тільки за зменшеною кількістю незалежних даних \mathbf{I}_{hc2} . Зрозуміло, що дані вимірювань зі стаціонарно встановлених

аналізаторів гармонік забезпечать більшу точність вектора \mathbf{I}_{hc} порівняно з вектором \mathbf{I}_h . Тому E_r у виразі (1) є показником якості обмежених вимірюваннями нейронних оцінок. Велике значення E_r може означати, що наявні джерела гармонік не враховано в навчальному процесі нейронної мережі або ж їх не включено в рівняння обмежень (2).

Якщо у процесі контролю відомих джерел гармонік визначена за формулою (1) величина E_r стає більшою від встановленого порогу, то це означає, що оцінка є неточною. У цьому разі або початкові дані є поза множиною тренувальних даних нейронної мережі, спричиняючи помилкову нейронну оцінку, або може існувати невідоме джерело струмів вищих гармонік, яке не враховано в рівнянні обмежень (2). У першому випадку, нейронна мережа повинна отримати нову “порцію” тренувальних даних для розширення області оцінки. Якщо ж нейронні оцінки знаходяться в межах заданої множини, збільшення E_r може бути викликаним неповною формою рівняння обмежень, і ця особливість може бути застосована для розпізнавання невідомого джерела гармонік у мережі.

Коли у певних вузлах електричної мережі вмикають конденсаторні батареї чи фільтри вищих гармонік, з огляду на несинусоїдний режим це можна розглядати як ввімкнення додаткового джерела гармонік, яке збільшує чи зменшує генерування гармонік у цьому вузлі. Використовуючи цю особливість, автори розробили принципи побудови системи ідентифікації компенсувальних пристроїв на несинусоїдний режим електричної мережі. Причому така система здатна оцінювати і випадки невдалих з огляду якості електроенергії рішень щодо встановлення фільтрів вищих гармонік чи конденсаторних батарей.

Для формування вектора нейронних оцінок без обмежень, які накладають вимірювання у досліджуваній електричній мережі, можемо взяти структуру нейронної мережі, зображеної на рис. 3.

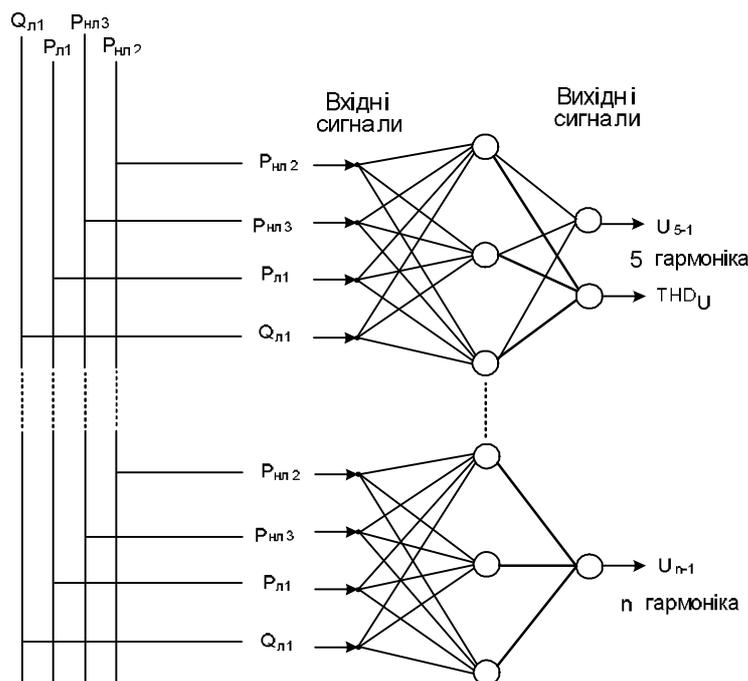


Рис. 3. Нейронна мережа для моніторингу гармонік напруги на підстанції П1

Вхідними даними нейронної мережі тут взято потужності $P_{нл2}$, $P_{нл3}$ та повна потужність на початку лінії Л1 – $P_{л1} + jQ_{л1}$, а вихідними (цільовими) даними – коефіцієнт несинусоїдності напруги THD_U та гармоніки напруги U_{n-1} на шинах 110 кВ П-1. Призначенням такої нейронної мережі є визначення “еталонних” коефіцієнтів несинусоїдності при певних параметрах електричної мережі. Для формування навчальної множини тут також використано модель електричної мережі для розрахунку миттєвих значень координат відповідної множини несинусоїдних режимів.

Нейронні оцінки коефіцієнта несинусоїдності напруги THD_U та гармонік напруги U_{n-1} в процесі моніторингу порівнюються з їх вимірними значеннями. Різниця між ними дозволяє зробити висновок про вплив на режим електричної мережі компенсувальних пристроїв. Тобто, якщо таке відхилення стає значним – то це свідчить про появу факторів, що впливають на рівень гармонік у мережі. У системі ідентифікації впливу компенсувальних пристроїв ця нейронна мережа повинна функціонувати паралельно з нейронною мережею, показаною на рис. 2. Вона слугує для сигналізації черговому диспетчеру про істотні зміни в роботі електричної мережі, що мають вплив на показники якості електроенергії. Це також може свідчити, як було вже зазначено, про можливу похибку у роботі нейронної мережі, якщо з'явилися інші фактори, що впливають на роботу електричної мережі з компенсувальними пристроями.

Для прикладу на рис. 4 показано розкид абсолютних похибок нейронних оцінок відносних значень 5 гармоніки напруги U_{5-1} на шинах підстанції П1 для різних режимів роботи електричної мережі з і без конденсаторної батареї на підстанції П2.

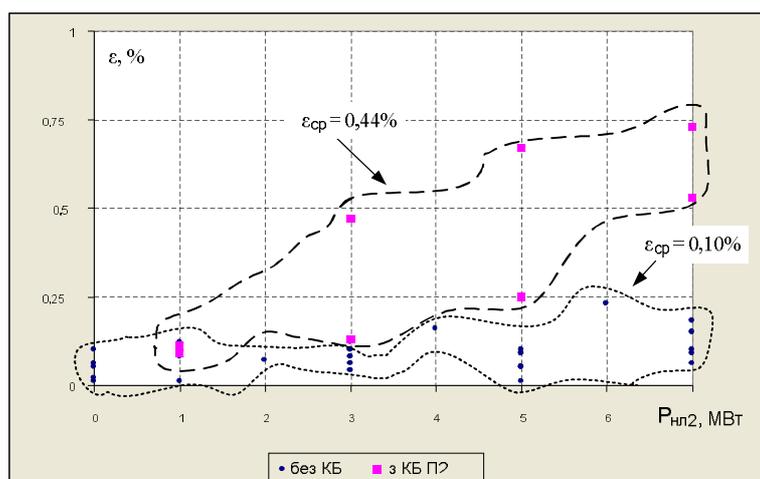


Рис. 4. Розкид абсолютних похибок нейронних оцінок U_{5-1} на підстанції П1

Можна зауважити, що абсолютна похибка нейронних оцінок у режимах роботи мережі без конденсаторних батарей не перевищує 0,25 %, у той час як під час роботи конденсаторних батарей ця похибка переважно зростає у 3–5 разів. На рис. 4 наведено також значення середньоквадратичних похибок для різних режимів електричної мережі з конденсаторними батареями і без них у цьому випадку, котрі відповідно становлять 0,44 та 0,10 %. Авторами досліджено також режими електричної мережі з різними комбінаціями конденсаторних батарей на підстанціях електричної мережі і в результаті отримано подібні порівняльні характеристики похибок. Це вказує на те, що за усередненими за певний період моніторингу результатами можна надійно судити про зміну несинусоїдного режиму мережі, викликану компенсувальними пристроями. Отже, аналізуючи похибку між вимірними на головній підстанції значеннями показників несинусоїдності та їх нейронними оцінками черговий персонал зможе слідкувати за зміною режимів роботи компенсувальних пристроїв в електричній мережі.

Висновки. В роботі запропоновано та досліджено структуру інтелектуальної системи моніторингу для аналізу впливу пристроїв компенсації реактивної потужності на рівні гармонік в електричній мережі. У результаті доказано здатність такої системи здійснювати надійну оцінку несинусоїдних режимів подібних електричних мереж.

1. Heydt G.T. Identification of harmonic sources by a state estimation technique // IEEE Trans. Power Deliv. – 1989. – Vol. 4, no. 1. – P. 569–575. 2. Najjar M. and Heydt G.T. A hybrid nonlinear least squares estimation of harmonic signal levels in power systems // IEEE Trans. Power Deliv. – 1991. –

Vol. 6, no. 1. – P. 282–288. 3. 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 Deliv.* – 1993. – Vol. 8, no. 3. – P. 1303–1310. 4. Hartana Y.Y., and Richards G.G. Constrained neural network-based identification of harmonic sources // *IEE Proc. – Gener. Transm. Distr.* – May 1999. – Vol. 146. – P. 325–329. 5. Varetsky Y., Nakonechny T. Monitoring Harmonic Sources in Distribution System by Neural Network Estimator // *Proc. of 9-th Int. Conf. Electrical Power Quality and Utilisation.* – Barcelona, 9–10 October, 2007. – P. 451–454. 6. Варецький Ю.О., Наконечний Т.І. Моделювання несинусоїдних режимів електричної мережі як засіб для побудови нейронної мережі // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”.* – 2007. – № 597: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 114–123.

УДК 621.3.011

Ю.М. Васецкий, И.Л. Мазуренко
Институт электродинамики НАН Украины

ОЦЕНКА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ ПО ЗАДАННОМУ УСЛОВИЮ ДЖОУЛЕВОЙ ДИССИПАЦИИ В ДВИЖУЩЕЙСЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОЛОСЕ

© Васецкий Ю.М., Мазуренко И.Л., 2009

Асимптотичні методи дослідження використано для отримання оцінок геометричних параметрів електромагнітних систем індукційного нагрівання металевих смуг. Проаналізовано індуктори у вигляді струмових контурів як плоскої, так і просторової конфігурацій. Розрахунки підтвердили коректність знайдених геометричних параметрів.

Asymptotic methods are used for estimation of geometrical parameters of electromagnetic systems for induction heating of metal strips. Both spatial and flat current configurations of inductors are analyzed. The calculations have confirmed correctness of obtained geometrical parameters.

Постановка проблемы. Исследование совместного проявления тепловых и электромагнитных процессов в движущихся электропроводных средах с трехмерной структурой полей представляет собой важную и в то же время трудную в расчетном отношении проблему. Задача еще более усложняется при необходимости нахождения такой геометрической конфигурации электромагнитной системы, при которой обеспечивается заданное распределение джоулевой диссипации или температуры среды. По существу в этом случае решается задача синтеза в теории электромагнитного поля – поиска геометрии электромагнитной системы по условию, накладываемому на распределение поля или его характеристик. К такой постановке приводят задачи индукционного нагрева металлических изделий [1].

Анализ последних достижений и публикаций. В данной работе рассматривается задача по определению геометрических характеристик электромагнитной системы для равномерного по ширине нагрева металлической ленты, движущейся в высокочастотном электромагнитном поле. Считается, что поле создается индуктором без сердечника, выполненным в виде катушечной рамки. Подобная система рассматривалась ранее в [2–4], где анализировалось влияние геометрии индуктора на распределение