

УДК 621.315

П. П. Говоров¹
В. Л. Бакулевський²

ПОЛІПШЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

¹Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова;

²Механіко-технологічний технікум Одеської національної академії харчових технологій

Втрати потужності в енергетичних мережах є найважливішим показником їх ефективності, чітким індикатором стану системи обліку електроенергії та ефективності енергопостачальних організацій.

На думку міжнародних експертів, втрати електроенергії під час передачі та розподілу в електричних мережах більшості країн можуть вважатися задовільними, якщо вони не перевищують 4...5%. Втрати електроенергії на рівні 10% можна вважати максимально допустимими з точки зору фізики передачі електроенергії по мережах. Різке загострення проблеми зниження втрат електроенергії в електричних мережах вимагає активного пошуку нових шляхів її вирішення, нових підходів до вибору відповідних заходів і організації роботи по скороченню втрат.

Сьогодні основним формалізованим засобом аналізу функціонування та управління режимами є математичне моделювання, основою якого є набір математичних моделей, які адекватно відображають досліджувані процеси. Зростаюча складність електричних мереж, тенденція до всебічного розгляду процесів, що відбуваються в ній, посилення вимог до ефективності розрахунків приводить до об'єктивних труднощів в побудові і застосуванні традиційних багатовимірних нелінійних математичних моделей.

Необхідно переглянути і поліпити класичні математичні моделі розрахунку і прогнозування втрат електроенергії, які застаріли і не відповідають поточним вимогам. Їх використання неефективно і частково неможливо. Крім того, вони погано працюють з частковою нестачею вихідної інформації. Це обґрунтовує необхідність впровадження сучасних математичних моделей (зокрема, нейронних мереж) для поліпшення розрахунку і прогнозування втрат електроенергії в лініях електропередач електричних мереж. Для розрахунку і прогнозування втрат електроенергії у внутрішніх мережах на сьогодні найпоширеніші детерміновані та імовірнісні статистичні методи.

Ключові слова: прогнозування, втрати електроенергії, нейронні мережі, математичне моделювання.

Вступ

На думку міжнародних експертів [1]—[4], втрати електроенергії під час її передачі і розподілу в електричних мережах більшості країн можна вважати задовільними, якщо вони не перевищують 4...5%. Втрати електроенергії на рівні 10% можна вважати максимально допустимими з погляду фізики передачі електроенергії по мережах. Різке загострення проблеми зниження втрат електроенергії в електричних мережах вимагає активного пошуку нових шляхів її вирішення, нових підходів до вибору відповідних заходів та до організації роботи зі зниження втрат [3].

Сьогодні основним формалізованим засобом аналізу функціонування і управління режимами електромереж є математичне моделювання, основу якого складає сукупність математичних моделей, що адекватно відображають процеси, які досліджуються. Підвищення складності електромереж, тенденція до комплексного розгляду процесів, що відбуваються в них, посилення вимог до оперативності розрахунків приводить до об'єктивних труднощів побудови і застосування традиційних багатовимірних нелінійних математичних моделей [3]. Потребують перегляду та вдосконалення класичні математичні моделі розрахунку та прогнозування втрат електроенергії, які є застарілими і не відповідають сучасним вимогам. Їх використання є малоефективним, а частково немо-

жливим [4]. Крім того, вони погано працюють за часткової відсутності вхідної інформації [5], [6]. Цим обґрунтовується необхідність впровадження сучасних математичних моделей (зокрема, нейромереж) для поліпшення розрахунку та прогнозування втрат електроенергії в повітряних ЛЕП енергосистеми.

Сьогодні в багатьох українських енергопостачальних компаніях при розрахунках та прогнозуванні втрат електроенергії використовуються застарілі математичні моделі [7], [8]. Ці моделі засновані на екстраполяційних, детермінованих та ймовірносно-статистичних методах, застосування яких не відповідає вимогам сучасних енергосистем та призводить до значних похибок [9], [10].

В [11], а також у роботах українських [6]—[10], [12], [13] та іноземних фахівців [2]—[4] увага акцентується на необхідності удосконалення методологічного і технічного забезпечення, точнішого та повнішого врахування факторів, що впливають на втрати електроенергії в обладнанні, а також застосуванні поліпшених методів та моделей розрахунку та прогнозування втрат електроенергії з подальшим впровадженням у сучасне програмне забезпечення (ПЗ) [12], [13].

Метою дослідження є поліпшення математичної моделі розрахунку та прогнозування втрат електроенергії на основі нейронних мереж на прикладі повітряних ліній електропередач.

Для досягнення мети сформульовані та розв'язані задачі:

1. Порівняльний аналіз методів розрахунку та прогнозування технічних втрат електроенергії.
2. Удосконалення математичної моделі розрахунку технічних втрат електроенергії в нейромережевому базисі на прикладі повітряних ліній електропередач.

Результати дослідження

Порівняльний аналіз методів розрахунку та прогнозування технічних втрат електроенергії

Для розрахунку та прогнозування втрат електроенергії в вітчизняних мережах в теперішній час найрозповсюдженіші детерміновані та ймовірносно-статистичні методи.

Похибка детермінованих методів визначається детерміновано. Розрахунок похибки здійснюється шляхом порівняння результату розрахунку втрат за певним методом з так званим еталонним результатом, отриманим за наявності повної інформації. Розрахунок похибки відбувається на прикладі розрахунку декількох розподільних мереж, тому носить оцінний характер. Поширення оцінки в цілому на розподільну мережу вимагає окремого дослідження, яке зазвичай відсутнє. Крім того, що особливо важливо, детерміновані методи не враховують неточність початкових даних навантажень мережі під час побудови моделі графіка навантаження. Ще одним недоліком детермінованих методів є неможливість обліку дисперсійної складової втрат електроенергії, яка може бути присутньою навіть за нульового середньоквадратичного значення навантаження [8], [13].

З метою подолання вказаних недоліків отримали розвиток методи розрахунку втрат електроенергії, засновані на ймовірнісному підході. Але слід зазначити, що для побудови залежностей усіма ймовірносно-статистичними методами необхідно провести попередні детерміновані розрахунки втрат електроенергії для обмеженого числа схем і режимів мереж, тобто для обмеженої вибірки. Визначення втрат для інших схем і режимів здійснюється за отриманою залежністю без проведення електричних розрахунків мереж [8].

Будуючи залежності втрат електроенергії від чинників, що впливають на них, доводиться використовувати інформацію, призначену для оперативного управління та контролю за перевантаженням устаткування. Така інформація є неоднорідною і неповною, що зумовлює необхідність допущень, що дозволяють формалізувати алгоритм рішення [8, 13].

З цієї причини, а також внаслідок відсутності реального ймовірносно-статистичного опису початкової інформації, часто використання ймовірносно-статистичних методів для аналізу втрат електроенергії стає утрудненим. Оскільки значна частина початкової інформації може мати істотну невизначеність (в першу чергу це відноситься до режимних параметрів), необхідно використовувати для розрахунку та прогнозування нові методи, які включають в себе переваги ймовірносно-статистичних методів, а також дозволяють формалізувати інформацію з урахуванням мінімальних похибок. До таких методів належать нейромережі.

Вибір методу ґрунтувався на таких критеріях (табл. 1):

1. Участь експерта зведена до мінімуму під час розробки моделі.
2. Можливість роботи з зашумленими даними.
3. Добрі результати прогнозу за малих наборів даних.
4. Складність і час реалізації мають бути мінімальні.

5. Можливість роботи з лінгвістичною інформацією.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз методів розрахунку та прогнозування втрат електроенергії

Метод/критерій	1	2	3	4	5
Екстраполяційні методи	—	—	—	+	—
Детерміновані методи	—	—	+	—	—
Ймовірнісно-статистичні методи	—	—	—	+	+
Експертні методи	—	+	+	—	+
Нейронні мережі	+	+	+	+	+

Переваги застосування нейромереж: відсутність необхідності побудови математичної моделі аналізованого процесу; здатність відновлювати нелінійні функціональні залежності між параметрами (характеристиками), що вивчаються; ефективна робота в умовах неповноти вихідної інформації; можливість використання малих навчальних вибірок; швидкий відгук навченої нейромережі на надходження поточної інформації (на рівні обробки цих телевимірювань існуючими способами); забезпечення практично повного режимного діапазону роботи електричної мережі; облік практично необмеженої кількості чинників; висока міра адекватності режимів мережі; автоматична адаптація моделі, яка відбувається шляхом самонавчання.

У зв'язку з реформуванням ринку електроенергії, появою нових суб'єктів ринку, шляхом розподілу більших або об'єднання дрібних суб'єктів, статистика ретроспективних показників виявилася неактуальною. Об'єм статистики за новими суб'єктами ринку невеликий, тому вибір методу нейросистем, придатного для роботи з малими об'ємами ретроспективної інформації, є обґрунтованим.

Удосконалення математичної моделі розрахунку технічних втрат електроенергії в нейромережевому базисі на прикладі повітряних ліній електропередач

Математична модель нейрона має вигляд

$$S = \sum w_j x_j + b; \quad (1)$$

$$y = f(S), \quad (2)$$

де w_j — вага синапсу ($j = 1, 2, \dots, N$); b — значення зміщення; S — результат підсумовування; x_j — компонента вхідного вектора (вхідний сигнал), $j = 1, 2, \dots, N$; N — кількість входів нейрона; f — функція активації.

Модель штучної нейронної мережі (ШНМ) з реалізацією вихідної функції

$$\text{out}_y = \sum_{l=1}^r \sum_{j=1}^{m(r)} \sum_{i=1}^{n(m(r))} f(x_i, w_{ij}), \quad (3)$$

де y — вихідна функція; r — кількість шарів, шт.; m — кількість нейронів в шарі, шт.; n — номер нейрона; x — сигнал, який подається нейроном; w — вага між i -м та j -м нейронами.

Подаючи на входи ШНМ значення змінних x_1, x_2, \dots, x_n , на виході отримується значення функції $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$, яке є відгуком (реакцією) ШНМ:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{l=1}^H v_l \sigma(\omega_{l1} x_{l1} + \omega_{l2} x_{l2} + \dots + \omega_{ln} x_{ln} + u_l), \quad (4)$$

де n — кількість нейронів у вхідному шарі; $x_1 \dots x_n$ — вхідний вектор; H — кількість нейронів в прихованому шарі; $w_{i1} \dots w_{in}$ — ваги зв'язків між нейронами вхідного шару і нейронами прихованого шару ($i = 1 \dots H$); u_i — значення зсуву для кожного нейрона прихованого шару ($i = 1 \dots H$); $\sigma(w_{i1} x_{i1} \dots w_{in} x_{in} + u_i)$ — функція активації; v_i — вага зв'язку між нейронами прихованого шару і нейроном вихідного шару.

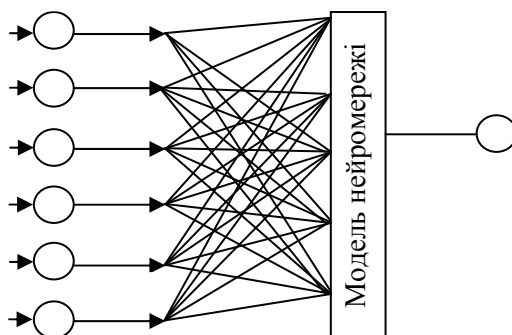


Рис. 1. Удосконалення моделі розрахунку технічних втрат електроенергії в повітряних ЛЕП на основі нейронних мереж

Програмна реалізація моделі проведена в ОС STATISTICA в нейроімітаторі Neural Networks за етапами (рис. 2).

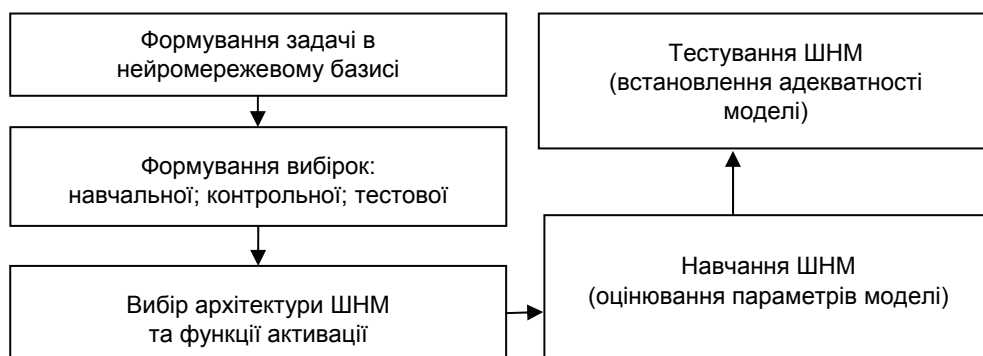


Рис. 2. Етапи розробки удосконаленої моделі розрахунку технічних втрат електроенергії в повітряних ЛЕП на основі ШНМ

В [14] запропонована модель штучної нейронної мережі (ШНМ) для розрахунку технічних втрат електроенергії в повітряних лініях електропередач напругою 6–35 кВ з такими параметрами: архітектура — багатoshаровий перцептрон, 7 нейронів у вхідному шарі, 5 нейронів — в прихованому шарі і 1 вихідний нейрон; вхідні змінні: активне навантаження ПЛ, номінальна напруга ПЛ, переріз проводу ПЛ, довжина проводу ПЛ, середньодобова температура повітря, швидкість вітру, наявність опадів; вихідна змінна — технічні втрати активної електроенергії в ПЛ; обсяги вибірок: навчальна — 250 спостережень, контрольна — 250 спостережень, тестова — 232 спостереження; функція активації — логістична; алгоритм навчання — в 2 етапи: на першому етапі — метод швидкого поширення, на другому — метод Левенберга-Марквардта.

Результати розробки та програмної реалізації запропонованої моделі нейромережі для розрахунку технічних втрат електроенергії в повітряних ЛЕП напругою 6–35 кВ наведені в [14]–[16].

Висновки

1. На підставі порівняльного аналізу методів розрахунку та прогнозування технічних втрат електроенергії доведена доцільність вибору методу на основі нейронних систем, який забезпечує можливість швидкої побудови моделі без участі експерта, роботи з зашумленими даними. Це актуально для теперішнього стану каналів передачі телеметрії з устаткування.

2. Проведено удосконалення математичної моделі для розрахунку технічних втрат електроенергії в нейромережевому базисі на прикладі повітряних ліній електропередач. Показано, що розроблена математична модель, в порівнянні з існуючими аналогами, має значно меншу відносну похибку моделювання, більше адаптована до сучасних електричних мереж, до використання малих навчальних вибірок, має швидкий відгук навченої нейромережі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Кабінет Міністрів України, Пост. №. 148 від 05.02.1997, *Комплексна державна програма енергозбереження України*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/148-97-%D0%BF>.

- [2] B. Hamid, and M. Walter, "Automated load forecasting using neural networks," in *Proc. Amer. Power Conf.*, Chicago, vol. 54, pp. 1149-1153., 1992.
- [3] P. C. Gupta, and K. Yamada, "Adaptive short-term forecasting of hourly loads using weather information," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-91, Issue 5, pp. 2085-2094, 1972. doi: 10.1109/tpas.1972.293541.
- [4] V. Panuska, "Short-term forecasting of electric power system load from a weather dependent model," *IFAC Symp. 1977. autom. contr. and prot. electr. power syst.*, Melbourne, pp. 414-418, 1977.
- [5] П. Ю. Красовський, «Фактори, що впливають на динаміку технічних втрат у лініях електропередач,» *Праці Дніпропетровського національного гірничого університету*, № 3, 2006.
- [6] А. А. Мирошник, «Уточненные алгоритмы расчета потерь электроэнергии в сетях 0,38 кВ в реальном времени,» *Проблемы региональной энергетики*, т. 2, № 13, с. 35-42, 2010.
- [7] С. В. Турбін, «Удосконалення методів визначення кліматичних навантажень на повітряні лінії з урахуванням топографічних особливостей місцевості,» *Енергетика та електрифікація*, № 10, с. 3-9, 2007.
- [8] В. Э. Воронцов, и О. В. Туркина, «Оценка погрешностей расчета переменных потерь электроэнергии в ВЛ из-за учета метеоусловий,» *Энергосистемы и электрические сети*, № 10, 2008.
- [9] И. И. Левченко, «Нагрузочная способность и мониторинг воздушных линий электропередачи в экстремальных погодных условиях,» *Электричество*, № 4, с. 2-8, 2008.
- [10] Ю. С. Железко, «Потери электроэнергии в электрических сетях, зависящие от погодных условий,» *Электрические станции*, № 11, 2004.
- [11] Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, пост. № 532, 2011. *Методика визначення технологічних витрат електроенергії у трансформаторах і лініях електропередавання*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.mega-billing.com/files/metodika_vtrat.pdf.
- [12] Ф. П. Говоров, и Т. А. Диалло, «Оценка риска нестабильности напряжения в электрических сетях,» *Техн. электродинамика. Тем. вып. «Проблеми сучасної електротехніки,»* Київ, № 7, с. 46-49, 2004.
- [13] Ф. П. Говоров, и Т. А. Диалло, «Управление режимами электрических сетей с учётом риска нестабильности напряжения,» *Техн. электродинамика. Тем. вып. «Силовая электроника та енергоефективність,»* Київ, № 1, с. 107-111, 2004.
- [14] V. Bakulevskiy, "Research into the influence of climatic factors on the losses of electric energy in overhead power transmission lines," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 5, Issue 8 (83), 2016. doi: 10.15587/1729-4061.2016.80072.
- [15] В. Л. Бакулевський, «Розробка алгоритму програмної реалізації моделі прогнозування технічних втрат електроенергії в повітряних лініях електропередачі напругою 6-35 кВ,» в *Матеріали V заочної наукової конференції «Наукові підсумки 2016 р.»*, ScienceRise, вип. 12/2 (29), с. 6-10, 2016.
- [16] В. Л. Бакулевський, «Тестування програмного забезпечення розрахунку технічних втрат електроенергії в повітряних лініях електропередач напругою 6-35 кВ,» *Вісник національного технічного університету ХПІ. Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси,»* вип. 50 (122), с. 55-62, 2016.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 5.01.2018

Говоров Пилип Парамонович — д-р. техн. наук, професор, академік, віце-президент Академії наук вищої освіти України, професор кафедри світлотехніки та джерел світла, e-mail: govorov@ksame.kharkov.ua.

Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків;

Бакулевський Володимир Леонідович — викладач, голова Циклової комісії електротехнічних дисциплін, e-mail: bakulevsky_80@mail.ru.

Механіко-технологічний технікум Одеської національної академії харчових технологій

P. P. Hovorov¹
V. L. Bakulevskiy²

Improvement of Mathematical Model of Calculation and Power Loss Forecasting on the Basis of Neural Networks

¹O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv;

²Odessa National Academy of Food Technologies

Power losses in power networks are the most important indicator of their efficiency, a clear indicator of the state of the electricity accounting system, and the efficiency of energy supplying organizations.

According to international experts, electricity losses during transmission and distribution in electricity networks of most

countries can be considered satisfactory if they do not exceed 4...5%. Electricity losses at the level of 10% can be considered the maximum permissible from the point of view of the physics of electricity transmission over networks. The sharp aggravation of the problem of reducing electricity losses in electric networks requires an active search for new ways of its solution, new approaches to choosing appropriate measures and organizing work to reduce losses.

Today, the main formalized means of analyzing the functioning and control of the grid modes is mathematical modeling, the basis of which is a set of mathematical models that adequately reflect the processes being investigated. Increasing the complexity of the power grids, the tendency to a comprehensive consideration of the processes occurring in them, the strengthening of the requirements for the efficiency of calculations leads to objective difficulties in constructing and applying traditional multidimensional nonlinear mathematical models. Need to revise and improve the classical mathematical models of calculation and forecasting of electricity losses that are obsolete and do not meet current requirements. Their use is ineffective and partially impossible. In addition, they work poorly with partial lack of input information. This substantiates the need for the introduction of modern mathematical models (in particular, neural networks) to improve the calculation and forecasting of electricity losses in the power lines of power grids.

For the calculation and forecasting of electricity losses in domestic networks at present, deterministic and probabilistic statistical methods are considered to be the most prevalent.

Keywords: forecasting, power losses, neural networks, mathematical modeling.

Hovorov Pylyp P. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Academician, Vice-President of the Academy of Sciences of Higher Education of Ukraine, Professor of the Chair of Lightning Technology and Sources of Light, e-mail: govorov@ksame.kharkov.ua ;

Bakulevskiy Volodymyr L. — Lecturer, Head of the Cyclical Commission, the Cycle Commission of Electrical Engineering Disciplines, Mechanics and Technology, College of Odessa National Academy of Food Technologies, e-mail: bakulevsky_80@mail.ru

Ф. П. Говоров¹
В. Л. Бакулевский²

Улучшение математической модели расчета и прогнозирование потерь электроэнергии на основе нейронных сетей

¹Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова;

²Механико-технологический техникум Одесской национальной академии пищевых технологий

Потери мощности в энергетических сетях являются наиболее важным показателем их эффективности, четким индикатором состояния системы учета электроэнергии и эффективности энергоснабжающих организаций.

По мнению международных экспертов, потери электроэнергии при передаче и распределении в электрических сетях большинства стран могут считаться удовлетворительными, если они не превышают 4...5%. Потери электричества на уровне 10% можно считать максимально допустимыми с точки зрения физики передачи электроэнергии по сетям. Резкое обострение проблемы снижения потерь электроэнергии в электрических сетях требует активного поиска новых путей ее решения, новых подходов к выбору соответствующих мер и организации работы по сокращению потерь.

На сегодня основным формализованным средством анализа функционирования и управления сетчатыми режимами является математическое моделирование, в основе которого набор математических моделей, адекватно отражающих исследуемые процессы. Возрастающая сложность электрических сетей, тенденция к всестороннему рассмотрению происходящих в них процессов, усиление требований к эффективности расчетов приводит к объективным трудностям в построении и применении традиционных многомерных нелинейных математических моделей.

Необходимо пересмотреть и улучшить классические математические модели расчета и прогнозирования потерь электроэнергии, которые устарели и не соответствуют текущим требованиям. Их использование неэффективно и частично невозможно. Кроме того, они плохо работают с частичной нехваткой исходной информации. Это обосновывает необходимость внедрения современных математических моделей (в частности, нейронных сетей) для улучшения расчета и прогнозирования потерь электроэнергии в линиях электропередач электрических сетей. Для расчета и прогнозирования потерь электроэнергии во внутренних сетях в настоящее время наиболее распространены детерминированные и вероятностные статистические методы.

Ключевые слова: прогнозирование, потери электроэнергии, нейронные сети, математическое моделирование.

Говоров Филипп Парамонович — д-р. техн. наук, профессор, академик, вице-президент Академии наук высшего образования Украины, профессор кафедры светотехники и источников света, e-mail: govorov@ksame.kharkov.ua ;

Бакулевский Владимир Леонидович — преподаватель, председатель цикловой комиссии электротехнических дисциплин механико-технологического техникума, e-mail: bakulevsky_80@mail.ru