

УДК 621.316.1

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.033>

## ОПТИМІЗАЦІЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РАЗІ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ІНФОРМАЦІЇ

**В.Г. Кузнецов\***, чл.-кор. НАН України, **Ю.І. Тугай\*\***, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна  
e-mail: [tugay@ukr.net](mailto:tugay@ukr.net)

*Запропоновано концепцію формування цільової функції для вирішення задачі оптимізації якості електричної енергії в електромережах, яка враховує фактор невизначеності інформації про параметри режиму. Це дасть змогу, на відміну від традиційної бінарної функції оцінки якості електричної енергії на відповідність встановленим нормам, враховувати динаміку зміни критерія ефективності й виконувати пошук оптимальних значень відповідних керуючих впливів. Наведено класифікацію інформаційних потоків про режим електричної мережі та визначено границі розмитості областей значень параметрів режиму. Показано, що цільову функцію доцільно формувати на основі нечіткої логіки. Визначено принципи формування нечітких математичних моделей для аналізу усталених нормальних режимів електричної мережі. Функції приналежності параметрів пропонується визначати з урахуванням якості інформації, яка може бути надана технічними засобами електричної мережі. Бібл. 5, рис. 3.*

**Ключові слова:** електрична мережа, якість електричної енергії, невизначеність інформації, нечітка математична модель.

Електрична енергія – товар, який використовується в усіх галузях національного господарства, але поняття її якості відрізняється від поняття якості інших товарів. Кожен споживач розрахований для нормальної роботи за певних характеристик якості електроенергії (ЯЕ), що зазвичай визначаються сукупністю певних величин параметрів режиму – показників. Рішення оптимізаційних задач в електроенергетиці переважно зводиться до побудови певного алгоритму, що дає змогу відшукувати екстремальні значення обраного критерію під час виконання заданих обмежувальних умов, а також визначити величини керуючих впливів, необхідних для досягнення екстремуму. Слід відзначити, що нині зростає вплив факторів, які зумовлюють спотворення параметрів нормальних режимів електричних мереж [1].

Для контролю за ЯЕ, яка постачається споживачам, зараз в Україні використовується стандарт ДСТУ EN 50160-2014 (гармонізований із міжнародними нормативними документами). Електричні величини, на значеннях яких базуються показники ЯЕ, вимірюються в метричних шкалах, тому доцільно використовувати такі характеристики, як стандартна невизначеність і розширена невизначеність. Стандартна невизначеність – це середнє квадратичне відхилення значення показника. Комбінована стандартна невизначеність – це невизначеність, отримана за результатами моделювання режиму. Розширена невизначеність – це добуток комбінованої стандартної невизначеності та більшого за одиницю коефіцієнта охоплення [2].

Однак в умовах прийнятого згідно зі стандартом бінарного підходу до контролю ЯЕ можна робити висновок про відповідність або не відповідність ЯЕ встановленим нормам, але не видається можливим визначити міру цієї відповідності. Це істотно знижує інформативність оцінки якості електроенергії, не дає змогу цілком відстежити динаміку зміни ЯЕ в процесі оптимізації та оцінити ці зміни. Тому для оптимізації ЯЕ є доцільним використання цільової функції, що спирається для врахування невизначеності на нечітку логіку [3]. Типи інформації про режими електричних мереж, що повинна враховуватися під час формування такої функції, наведено на рис. 1.

Під детермінованою інформацією розуміється інформація, що основана на закономірних причинно-наслідкових зв'язках та задається в чисельно-однозначній формі, і не змінюється в розглянутий період експлуатації (паспортні дані устаткування, склад ввімкненого устаткування і т.п.). Для спрощення розрахунків до детермінованої інформації відносять та-



кож так звану умовно-детерміновану інформацію, тобто ймовірнісну інформацію, що змінюється в незначних межах у разі зміни режиму мережі.

Ймовірнісна інформація описує стохастичний характер зміни параметрів режиму, сукупності елементів мережі, що відповідає цьому режиму.

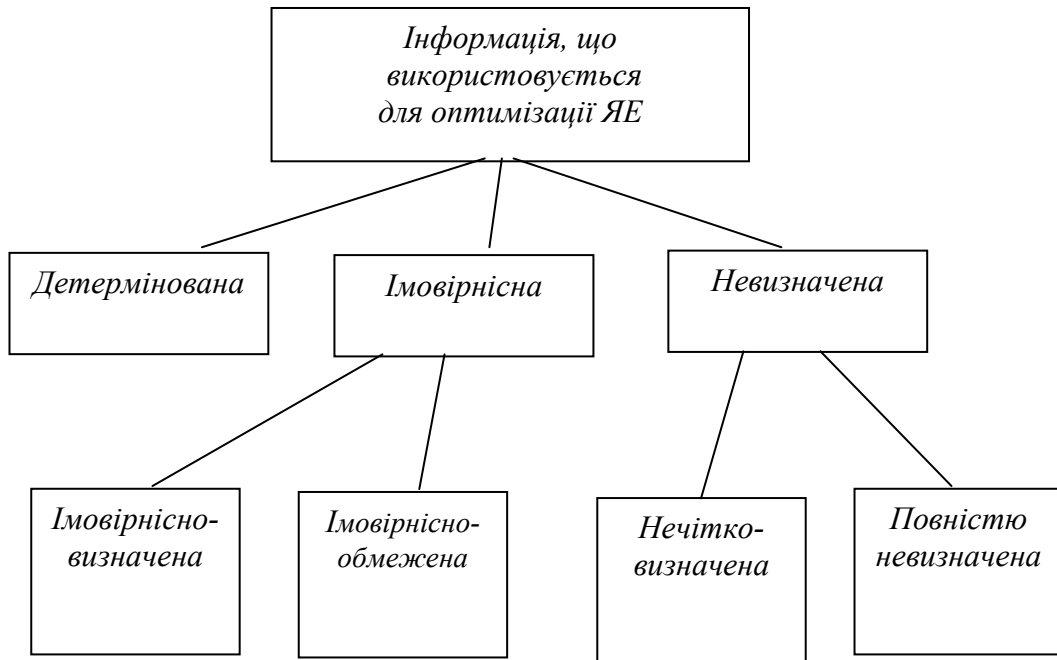


Рис. 1

Ймовірнісно-визначена інформація, відбиваючи фізичну сутність параметрів режиму, обумовлена тим, що параметри, власне, не можуть бути задані точно. Однак статистичних вибірок з випадкових процесів достатньо для встановлення їхніх законів розподілу та достовірного визначення ймовірнісних характеристик.

Ймовірнісно-обмежена інформація характеризується неповним обсягом вибірки, необхідної для достовірного опису параметрів випадкового процесу, і не дає змогу традиційними методами виявити закономірності процесів, що досліджуються. Інакше кажучи, словами обмеженість обсягу вибірки, обумовлена умовами експлуатації, не дає змогу забезпечити необхідну точність опису параметрів режиму.

Невизначена інформація – це така інформація, яка дає змогу описати кількісні значення параметрів режиму або схемний стан мережі лише наближено, спираючись тільки на номінальні параметри елементів мережі та можливу сукупність включених і відключених елементів схеми, і відповідає випадковому або стохастичному впливу на систему.

Нечітко визначена інформація характерна для випадків, коли відомий лише можливий діапазон зміни параметрів режиму або схеми мережі.

Повністю невизначена інформація відповідає випадкам повної необізнаності про об'єкт і визначає неоднозначність його опису.

Для визначення повноти та достовірності інформації, що забезпечує необхідну точність рішення задач системного аналізу втрат електроенергії, необхідно визначити граничний рівень  $\alpha$  для розмитих областей, кількісне значення якого відповідає оптимальним параметрам якості інформації ( тобто повноті та достовірності):

$$\alpha = \frac{1}{\ln N \sum_{i=1}^N \mu_{A_i}(A_i)} \left[ \sum_{i=1}^N \mu_{A_i}(A_i) \cdot \ln \sum_{i=1}^N \mu_{A_i}(A_i) - \sum_{i=1}^N \mu_{A_i}(A_i) \cdot \ln \mu_{A_i}(A_i) \right],$$

де  $\mu_{\tilde{A}_i}(A_i)$  – функція приналежності для  $i$ -го з перерахованих вище множин, тобто  $A_I, A_{II}, A_{III}, A_{IV}$ ;  $N$  – число варіантів множини інформації.

Запропонований критерій якості інформації дає змогу класифікувати інформацію та застосовувати ті математичні моделі, які дають найбільшу точність її опису, тим самим забезпечуючи прийнятну точність вирішення задачі. Для формування математичної моделі, яка враховує різні типи інформації під час системного аналізу ЯЕ, невизначеність інформації доцільно представити за допомогою когнітивної карти (рис. 2).

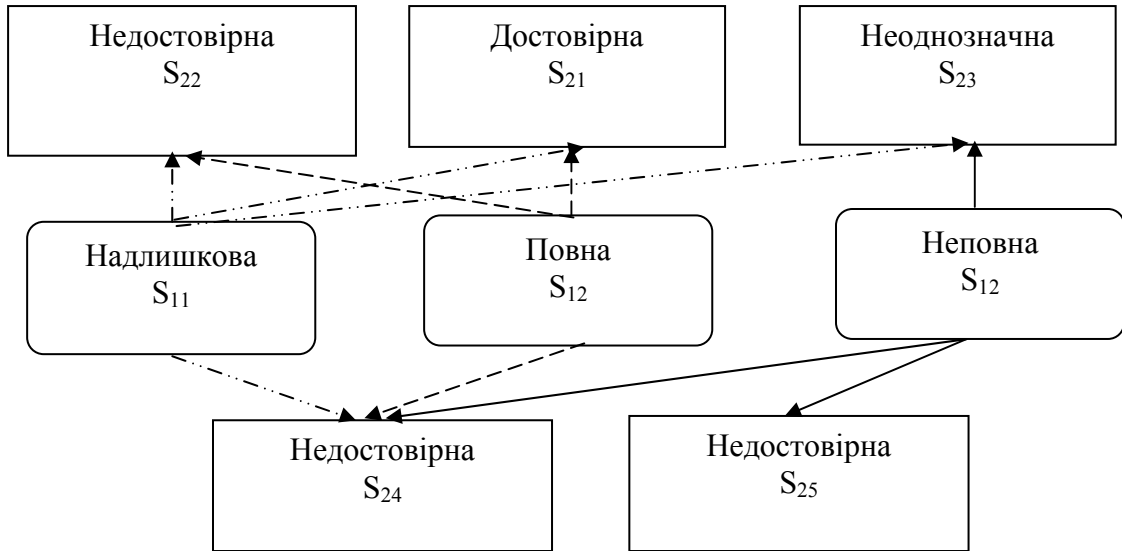


Рис. 2

Тут розглянуто дві системи: S1, що розбита на три підсистеми, і S2 та їхній зв'язок. Водночас система S2 розбита на п'ять підсистем, що обумовлюють властивості низької якості інформаційної моделі за винятком властивості достовірності. Згідно з когнітивною картою невизначеності в разі оптимізації ЯЕ необхідно побудувати таке відображення S2 в S1, щоб залежно від ваги (ступеню) впливу підсистем системи S2 на систему S1 формувалася правильний вибір математичної моделі процесу зміни параметрів режиму в умовах невизначеності інформаційних потоків, який забезпечить необхідну точність оцінки якості електроенергії на різних часових інтервалах. Системи S1 і S2, а також відповідно їхні підсистеми представляються нечіткими множинами, а ступінь впливу – функцією приналежності.

$$\varphi_{s_{11}} = \varphi(s_{21}, s_{22}, s_{23}, s_{24}) = s_{21} + s_{22}s_{23} + s_{24} + s_{22}s_{24} + s_{22}s_{23}s_{24},$$

$$\varphi_{s_{12}} = \varphi(s_{21}, s_{22}, s_{24}) = s_{21} + s_{22} + s_{24},$$

$$\varphi_{s_{13}} = \varphi(s_{23}, s_{24}, s_{25}) = s_{23} + s_{24} + s_{25} + s_{23}s_{24} + s_{23}s_{25} + s_{24}s_{25} + s_{23}s_{24}s_{25},$$

З урахуванням властивостей поглинання для спрощення структурних функцій, одержимо:

$$\varphi_{s_{11}} = \varphi(s_{21}, s_{22}, s_{23}, s_{24}) = s_{21} + s_{24} + s_{23}s_{24},$$

$$\varphi_{s_{13}} = \varphi(s_{23}, s_{24}, s_{25}) = s_{23} + s_{24} + s_{25} + s_{23}s_{24}.$$

Представимо кожен структурну функцію у вигляді мережі, зображеної на рис. 3, де  $a$  – надлишкова інформація;  $b$  – повна інформація;  $c$  – неповна інформація.

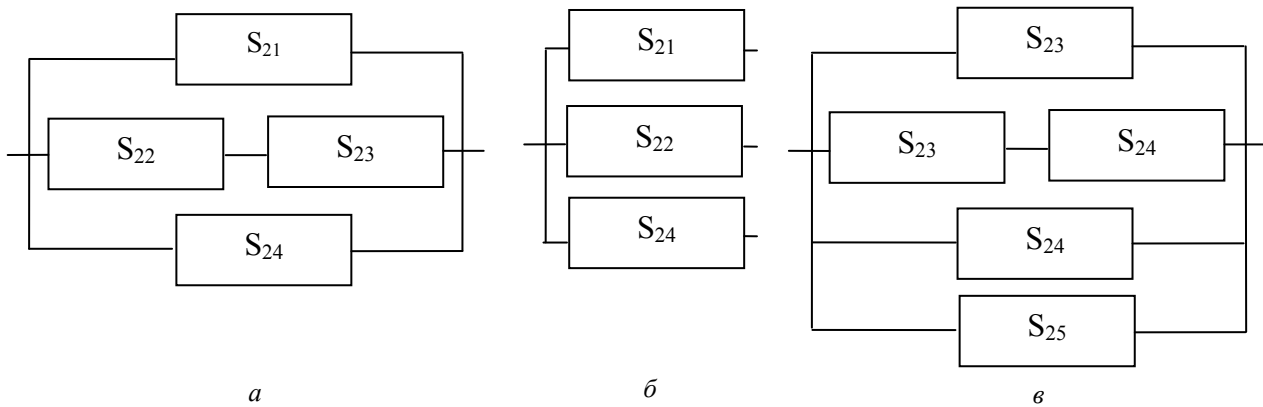


Рис. 3

Максимальне значення функції приналежності покаже ступінь впливу  $i$ -ої сукупності нечітких підмножин множини  $\mathcal{S}_2$  та дасть змогу визначити повноту та достовірність інформації про режимні змінні, що, зі свого боку, визначить вибір математичного опису електричної мережі і її режимних параметрів. З урахуванням опису послідовних і паралельних мереж рівень якості інформації кожної нечіткої множини можна представити в такий спосіб:

$$\begin{aligned}\psi_{s_{11}} &= \psi(s_{21}, s_{22}, s_{23}, s_{24}) = \mu_{s_{21}}(S_{21}) \vee (\mu_{s_{22}}(S_{22}) \wedge \mu_{s_{23}}(S_{23})) \vee \mu_{s_{24}}(S_{24}) = \\ &= \max[\mu_{s_{21}}(S_{21}), \min(\mu_{s_{22}}(S_{22}), \mu_{s_{23}}(S_{23}), \mu_{s_{24}}(S_{24}))], \\ \psi_{s_{12}} &= \psi(s_{21}, s_{22}, s_{24}) = \mu_{s_{21}}(S_{21}) \vee \mu_{s_{22}}(S_{22}) \vee \mu_{s_{24}}(S_{24}) = \\ &= \max[\mu_{s_{21}}(S_{21}), \mu_{s_{22}}(S_{22}), \mu_{s_{24}}(S_{24})], \\ \psi_{s_{13}} &= \psi(s_{23}, s_{24}, s_{25}) = \mu_{s_{23}}(S_{23}) \vee \mu_{s_{24}}(S_{24}) \vee \mu_{s_{25}}(S_{25}) = \\ &= \max[\mu_{s_{23}}(S_{23}), \mu_{s_{24}}(S_{24}), \mu_{s_{25}}(S_{25})],\end{aligned}$$

Тим самим показник якості інформаційних потоків прийме вигляд

$$\psi(\mathcal{S}_{11}, \mathcal{S}_{12}, \mathcal{S}_{13}) = \psi_{s_{11}} \vee \psi_{s_{12}} \vee \psi_{s_{13}}.$$

Звідки

$$\psi(\mathcal{S}_{11}, \mathcal{S}_{12}, \mathcal{S}_{13}) = \max[\mu_{s_{11}}(S_{11}), \mu_{s_{12}}(S_{12}), \mu_{s_{13}}(S_{13})].$$

Максимальне значення функції приналежності показує ступінь впливу  $i$ -ої сукупності нечітких підмножин множини  $\mathcal{S}_2$  та дасть змогу визначити повноту та достовірність інформації про режимні змінні, що, зі свого боку, визначить вибір математичного опису електричної мережі і її режимних параметрів. Таким чином, маючи залежності для розрахунку функцій належності нечітких норм ЯЕ та розраховані з використанням вимірів функції приналежності показників ЯЕ, отримуємо набір значень функцій приналежності для кожного показника ЯЕ [4]. Традиційний детермінований підхід призначено найімовірніше для фіксації самого факту наявності неякісної електроенергії та визначення заходів щодо нормалізації ЯЕ за цим фактом [5]. Водночас запропонована методологія дає змогу відстежувати зміну якості електроенергії, навіть, якщо основні показники не виходять за межі допустимих значень, проводити аналіз динаміки зміни ЯЕ та оптимізацію.

1. Кузнецов В.Г., Шполянський О.Г., Яремчук Н.А. Узагальнений показник якості енергії в електричних мережах і системах. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 3. С. 46–52.
2. Яремчук Н.А., Гола О.Ю., Проскін В.В. Оцінювання комплексного показника якості складного об'єкта з характеристикою невизначеності. *Український метрологічний журнал*. 2018. № 2. С. 9–17.

3. Mauris G., Lassere V., Foulley L. A fuzzy approach for the expression of uncertainty in measurement. *Measurement*. 2001. No 29. Pp. 109–121.
4. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И., Тимчук С.А., Черемисин Н.М. Методика оценки качества электроэнергии в нечеткой форме. *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*. 2014. № 1. С. 18–21.
5. Tymchuk S., Miroshnyk O. Assess electricity quality by means of fuzzy generalized index *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 3. No 4 (75). Pp. 26–31.

## OPTIMIZATION OF THE QUALITY OF ELECTRICITY WITH INFORMATION UNCERTAINTY

V.G. Kuznetsov, Yu.I. Tugay

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteiskyyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: [tugay@ukr.net](mailto:tugay@ukr.net)

*The concept of forming an objective function for solving the problem of the quality of electrical energy optimizing in power networks is proposed, which takes into account the uncertainty factor of information about the mode parameters. This will allow, in contrast to the traditional binary function of assessing the quality of electrical energy for compliance with the established standards, to take into account the dynamics of changes in the efficiency criterion and perform the search for optimal values of the relevant controlling influences. The classification of information flows about the mode of the electric network is presented and the boundaries of fuzzy set for the values of the mode parameters are defined. It is shown that the objective function should be appropriately formed on the basis of fuzzy logic. The principles of the formation of fuzzy mathematical models for the analysis of established normal modes of the electrical network are defined. It is proposed to determine the membership function of a fuzzy set taking into account the quality of information that can be provided by the technical means of the electrical network. Ref. 5, fig. 3.*

**Keywords:** electrical network, quality of electrical energy, uncertainty of information, fuzzy mathematical model.

1. Kuznetsov V.G., Shpolianskyi O.G., Yaremchuk N.A. Generalized indicator of energy quality in electrical networks and systems. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2011. No. 3. Pp. 46–52. (Ukr)
2. Yaremchuk N.A., Goda O.Yu., Proskin V.V. Evaluation of a complex indicator of the quality of a complex object with a characteristic of uncertainty. *Ukrainian Metrological Journal*. 2018. No 2. Pp. 9–17. (Ukr)
3. Mauris G., Lassere V., Foulley L. A fuzzy approach for the expression of uncertainty in measurement. *Measurement*. 2001. No 29. Pp. 109–121.
4. Kuznetsov V.G., Tugai Y.I., Tymchuk S.A., Cheremisyn N.M. The method of estimating the quality of electricity in a fuzzy form. *Energy and computer-integrated technologies in agriculture*. 2014. No 1. Pp. 18–21. (Rus)
5. Tymchuk S., Miroshnyk O. Assess electricity quality by means of fuzzy generalized index. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 3 No. 4 (75) Pp. 26–31.

Надійшла: 31.05.2023

Прийнята: 27.06.2023

Submitted: 31.05.2023

Accepted: 27.06.2023