

УДК 515.12

Б. І. Мокін, д. т. н., проф.; В. В. Камінський, к. т. н., доц.**ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ СТВОРЕННЯ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ
ФУНКЦІЙ РІВНІВ СЛАБКІХ МНОЖИН НАВАНТАЖЕННЯ
У ВУЗЛАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАЛЬНИХ СИСТЕМ**

У роботі, базуючись на результатах проведених теоретичних досліджень та експертних процедур, сформульовано загальні принципи побудови функцій рівнів слабких множин потужності вузлів електропостачальних систем. Отримані результати можуть бути використані в процесі створення непрямих параметричних методів побудови таких функцій.

Ключові слова: слабка множина потужності, функція рівнів, напрямленість, напрямлений рівень належності.

У роботах [1 – 2] авторами запропоновано новий підхід до моделювання складних систем в умовах невизначеності даних з використанням розроблюваного ними апарату теорії слабких множин.

Слабка множина \tilde{A} в універсумі X , на відміну від нечіткої множини \tilde{A} , задається не функцією належності $\mu_A: X \rightarrow M_\alpha$, а функцією рівнів $\nu_A: X \rightarrow M_{\alpha\omega}$, де $M_{\alpha\omega} = M_\alpha \times M_\omega \setminus \{(\vee M_\alpha; -)\}$ – простір напрямлених рівнів належності, $M_\alpha = [0; 1]$ – простір ненапрямлених (звичайних) рівнів належності, $M_\omega = \{+, -\}$ – простір напрямленостей, $\vee M_\alpha = 1$ – максимальний елемент простору M_α . Елементи простору $M_{\alpha\omega}$ є упорядкованими парами виду $(\alpha; +)$, $(\beta; -)$, $\alpha, \beta \in M_\alpha$ і називаються позитивно (для випадку $(\alpha; +)$) та негативно (для випадку $(\beta; -)$) напрямленими рівнями належності. Для зручності ці упорядковані пари позначаються також α^+ , β^- відповідно. У просторі ненапрямлених рівнів належності існує звичайний нестрогий лінійний порядок, а в просторі напрямленостей задається лінійний порядок $\{(+, +), (+, -), (-, -)\}$. Напрявлені рівні належності в просторі $M_{\alpha\omega}$ строго впорядковані бінарним відношенням строгого порядку виду

$$\forall (\alpha, \omega_\alpha), (\beta, \omega_\beta) \in M_{\alpha\omega} ((\beta, \omega_\beta) > (\alpha, \omega_\alpha) \Leftrightarrow (\beta > \alpha \wedge \omega_\beta = \omega_\alpha) \vee (\omega_\beta > \omega_\alpha)), \quad (1)$$

а діагональне відношення рівності на $M_{\alpha\omega}$ має вигляд

$$\forall (\alpha, \omega_\alpha), (\beta, \omega_\beta) \in M_{\alpha\omega} ((\alpha, \omega_\alpha) = (\beta, \omega_\beta) \Leftrightarrow \alpha = \beta \wedge \omega_\alpha = \omega_\beta). \quad (2)$$

Далі в роботі під відношеннями порядку та рівності на множині $M_{\alpha\omega}$ будуть матися на увазі відношення (1) та (2) відповідно. Зокрема виконання відношення \geq буде означати виконання відношень (1) або (2).

У роботі [3] показано, як можна моделювати невизначені параметри електропостачальних систем (ЕПС) із допомогою слабких множин, функції рівнів яких не задають елементам універсуму жодних конкретних ступенів належності слабкій множині, а лише напрямлені рівні належності. У разі моделювання невизначених параметрів ЕПС останні доцільно інтерпретувати таким чином. Позитивно напрямлені рівні належності – як нижню точну грань можливих значень ступенів належності відповідних елементів універсуму в тоді, як верхня грань належності цих елементів ніяк не регламентується й обмежується тільки максимальним елементом $\vee M_\alpha$ простору ненапрямлених рівній належності. Негативно напрямлені рівні належності інтерпретуються як верхня точна грань можливих значень ступенів належності тоді, як нижня точна грань належностей елементів універсуму, які мають негативний рівень належності, ніяк не задається й обмежується тільки мінімальним елементом $\wedge M_\alpha = 0$ простору M_α .

На сьогодні відомо тільки одне джерело інформації для побудови функцій належності нечітких множин та функцій рівнів слабких множин – експертні оцінки параметрів цих функцій. Наукові праці ВНТУ, 2011, № 1

цій. Для побудови функцій належності нечітких множин на основі експертного опитування розроблено значну кількість методів [4, 5]. Аналогічні методи побудови функцій рівнів слабких множин до цього часу не відомі. У цій роботі вперше проаналізовано особливості побудови функцій рівнів слабких множин на основі експертних процедур та сформульовано принципи створення відповідних методів на прикладі функцій рівнів слабких множин потужності елементів ЕПС, запропонованих авторами в роботі [3].

Обґрунтовуючи принципи побудови функцій рівнів слабких множин, будемо виходити з досвіду використання відомих методів побудови функцій належності нечітких множин.

Методи побудови функцій належності нечітких множин на основі експертного опитування можна поділити на прямі та непрямі, які у свою чергу поділяються на методи для одного експерта та методи для групи експертів. Прямі методи передбачають безпосереднє призначення ступенів належності елементам універсуму або задання аналітичної функції, яка буде виступати в якості функції належності. Експертна інформація в непрямих методах є лише вихідною для подальшої побудови функцій належності за тими чи іншими правилами залежно від обраного методу. Тому з допомогою програмних експертних систем для непрямих методів результат експертної процедури, як правило, можна отримати значно швидше, ніж для прямих методів. На сьогодні існує значна кількість наукових робіт, присвячених розробці прямих і непрямих методів побудови функцій належності нечітких множин. У роботах [4, 5] подано огляд існуючих методів побудови функцій належності нечітких множин.

За аналогією до методів побудови функцій належності нечітких множин для слабких множин теж будемо відрізняти прямі та непрямі методи побудови функцій напрямлених рівнів належності. **Прямими** будемо називати методи, згідно з якими експерт безпосередньо призначає напрямлені рівні належності елементам універсуму, трактуючи їх як нижню точну грань можливих рівнів належності невідомій слабкій множині у випадку позитивно напрямлених рівнів належності або верхню точну грань рівнів належності (у випадку негативно напрямлених рівнів належності). **Непрямими** методами побудови функцій рівнів слабкої множини будемо називати методи, в яких експертна інформація не задає безпосередньо рівні належності, а є вихідною для їх визначення тим чи іншим способом, щоб задовольнити заздалегідь задані умови, які забезпечують однозначний результат побудови функції рівнів. Серед непрямих методів виділимо так званий **параметричний метод**, відповідно до якого вид функції рівнів задається аксіоматично або вибирається експертом чи особою, яка приймає рішення із заданого стандартного набору можливих графіків, кожен з яких задається тією чи іншою кількістю параметрів. Після цього в діалозі з ЕОМ експерт оцінює значення параметрів функції того виду, який був вибраний на попередньому етапі роботи. У результаті цього отримується конкретна функція рівнів слабкої множини. Якщо для методу побудови функції рівнів слабкої множини буде достатньо використання експертних оцінок тільки одного експерта, то такий метод будемо називати **методом для одного експерта**, а якщо метод буде вимагати використання експертних оцінок групи експертів, то – **методом для групи експертів**. Далі розглянемо основні принципи побудови функцій рівнів слабких множин потужності елементів ЕПС на основі непрямих параметричних оцінок цих функцій одним або групою експертів.

У роботі [3] авторами введено поняття звичайної множини активної потужності вузла електромережі $\{p\}$ з відомою потужністю P як множини виду $\{p \mid 0 \leq p \leq P\}$ і слабкої множини потужності \tilde{P} з функцією рівнів $v_P(p)$ такої, що

$$\exists p \geq 0 (v_P(p) = 1^+); \quad (3)$$

$$\exists p \geq 0 (v_P(p) = 0^-); \quad (4)$$

$$\forall p_1, p_2 \in \mathbb{N}_P^{-1}([0^-; 1^+]) (p_1 < p_2 \Rightarrow v_P(p_1) > v_P(p_2)); \quad (5)$$

$$\forall p_0 \in \mathbb{N}_P^{-1}(]0^-; 1^+]) \forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall p \geq 0 (\rho_R(p, p_0) < \delta \Rightarrow \rho_M(v_P(p), v_P(p_0)) < \varepsilon). \quad (6)$$

Умова (3) дозволяє сформулювати **перший принцип** побудови функцій рівнів слабких множин потужності елементів ЕПС, відповідно до якого для вузла електромережі з невизначеним навантаженням P експерт може задати таке навантаження $p \geq 0$, для якого з абсолютною впевненістю буде виконуватись умова $p \leq P$, що формально задається рівністю $v_P(p) = 1^+$. Аналогічно умова (4) дозволяє сформулювати **другий принцип**: для вузла електромережі з невизначеним навантаженням експерт може з абсолютною впевненістю назвати таку потужність p , яка буде перевищувати невідому потужність цього вузла, що формально відповідає рівності $v_P(p) = 0^-$.

Умова (5) фактично задає строго спадну функцію рівнів слабкої множини потужності вузла ЕПС на інтервалі значень потужності, який є повним прообразом відкритого інтервалу $]0; 1[$ при відображенні v_P , тобто $\mathbb{N}_P^{-1}(]0^-; 1^+])$. Ця умова дозволяє сформулювати **третій принцип** побудови функцій рівнів слабких множин потужності, відповідно до якого ступінь упевненості експерта в тому, що задана величина потужності не перевищує потужність елемента ЕПС, повинен зменшуватись зі збільшенням заданої величина потужності. Дійсно, нехай відносно потужності p_1 експерт має деякий рівень упевненості в тому, що p_1 не перевищує реальну потужність P вузла електромережі. Нехай точна грань цього рівня впевненості дорівнює $v_P(p_1)$. Очевидно, будь-яка більша потужність p_2 має більше шансів перевищити ту саму реальну потужність P вузла електромережі. Оскільки точна грань упевненості в тому, що $p_2 \leq P$ задається ступенем належності $v_P(p_2)$, то ми приходимо до умови (5).

Умова (6) задає **четвертий принцип**, відповідно до якого функція рівнів слабкої множини потужності повинна бути неперервною на інтервалі значень потужності $\mathbb{N}_P^{-1}(]0^-; 1^+])$. Останній принцип є досить природним з погляду вибраних об'єктів моделювання і процесу експертної оцінки їхніх значень. Дійсно, пояснити причину стрибкоподібної зміни граничного значення впевненості експерта в деякій точці $p_0 \in \mathbb{N}_P^{-1}(]0^-; 1^+])$ можна тільки помилкою експерта на цьому етапі експертної процедури або на попередніх її етапах.

П'ятий принцип, який необхідно враховувати в процесі виконання експертних процедур, очевидно, має полягати в тому, що параметри, які мусить оцінити експерт, не повинні носити формально математичного характеру без можливості чіткого їх формулювання на основі понять прикладної задачі, глибоко зрозумілих експерту.

Виходячи із перших двох та п'ятого принципів, можна зробити важливий висновок про те, що в непрямій параметричній процедурі побудови функцій рівнів слабких множин навантаження експерту доцільно доручити оцінку двох, добре зрозумілих йому, параметрів P_{\min} та P_{\max} , де P_{\min} відповідає найбільшому можливому значенню потужності, стосовно якого навіть нижня межа впевненості експерта в тому, що така потужність не перевищує потужності вузла мережі, дорівнює 100%, а P_{\max} відповідає найменшому можливому значенню потужності, для якого навіть верхня межа впевненості експерта в тому, що така потужність не перевищує потужності вузла мережі дорівнює нулю. Після оцінки цих параметрів з великою впевненістю можна вважати, що будь-яка потужність $p \leq P_{\min}$ не перевищує невідомої потужності вузла мережі, а будь-які значення $p \geq P_{\max}$ перевищують цю потужність. Щодо інтервалу можливих значень потужності елемента ЕПС $]P_{\min}; P_{\max}[$, то згідно з принципами 1 – 4 на цьому інтервалі залежність $v_P(p)$ повинна описуватись строго спадною неперервною функцією, яка задається двома параметрами.

У роботі [4] наводиться стандартний набір графіків функцій, які використовувались різними авторами в непрямих параметричних процедурах побудови функцій належності нечітких множин. Із цього набору авторами були вибрані графіки, які відповідають усім сформульованим вище вимогам до експертних процедур побудови функції рівнів слабкої множини потужності з точністю до заміни звичайних декартових осей координат на напрямлені осі, Наукові праці ВНТУ, 2011, № 1

введені авторами в роботі [6] для зображення графіків функцій рівнів слабких множин. Аналоги цих графіків у напрямлених осях зображено на рис. 1, 2. На рис. 1 зображено строго спадну неперервну на інтервалі можливих значень потужності $]P_{\min}; P_{\max}[$ функцію рівнів. Цю залежність $v(p)$, з точністю до відповідної заміни системи координат, можна апроксимувати за допомогою нормального закону Гаусса, який, як відомо, задається двома параметрами. Таку функцію рівнів слабкої множини будемо називати нормальною. На рис. 1 зображено графік звичайної спадної лінійної функції на інтервалі можливих значень потужності $]P_{\min}; P_{\max}[$. Таку функцію рівнів слабкої множини будемо називати лінійною. Цю функцію можна задати будь-якими двома точками, які лежать на лінії її графіка. Якщо для цього завжди використовувати точки $(P_{\min}; 1^+)$ та $(P_{\max}; 0^-)$, то, очевидно, лінійна функція рівнів слабкої множини потужності буде задаватись двома параметрами P_{\min} та P_{\max} .

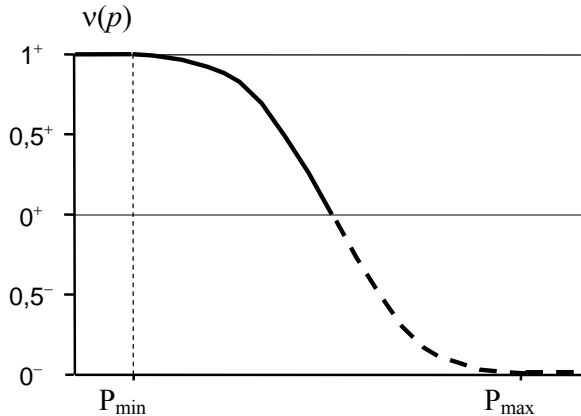


Рис. 1. Загальний вигляд функції рівнів нормальної слабкої множини потужності

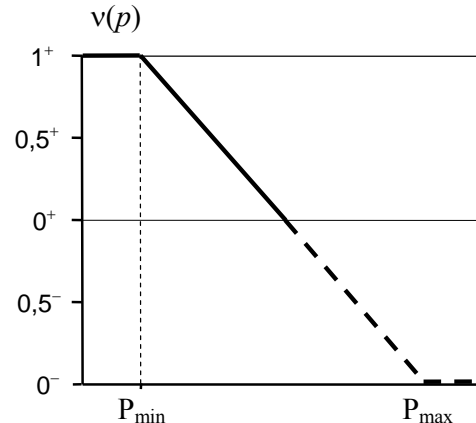


Рис. 2. Загальний вигляд функції рівнів лінійної слабкої множини потужності

Для того, щоб перевірити, який із відібраних функцій будуть віддавати перевагу експерти, авторами було сплановано та проведено експертні процедури з оцінки параметрів і вибору виду функцій рівнів слабкої множини потужності у вузлах вінницьких високовольтних електромереж, які не спостерігаються диспетчером. У проведених дослідженнях у ролі експертів виступали диспетчери та інженери групи режимів диспетчерських служб як найкомпетентніші фахівці в питаннях режимів електромереж. На роль експертів відбиралися найбільш досвідчені фахівці вказаної категорії зі стажем роботи не менше трьох років, які здатні були добре зрозуміти та засвоїти неформальний зміст експертної процедури. Окрім наведених на рис. 1, 2 видів функцій, експертам було надано можливість вибирати ще три види графіків функцій, які задаються більш ніж двома параметрами.

Результати виконаних досліджень показали, що в переважній більшості випадків експерти вибирали лінійний та нормальний вид функції рівнів, і лише в поодиноких випадках вибір падав на інші види цих функцій. Причому для різних вузлів електромережі як різні експерти, так і один, той самий експерт вибирали як однакові, так і різні види функцій. При цьому для випадку лінійної функції рівнів задавалася, як правило, суттєво менша довжина відрізка $[P_{\min}; P_{\max}]$, ніж для випадку нормальної функції. Окрім заданого вузла мережі, на вибір експертом виду функції рівнів впливали час доби, день тижня та пора року, для яких виконувалась експертна оцінка слабкої множини потужності. Автори поставили перед собою завдання виявити закономірність у виборі експертами нормального або лінійного виду функції рівнів слабкої множини потужності.

Таку закономірність було виявлено в результаті виконаного авторами, за участю експертів, аналізу обставин, за яких проводилась експертиза. Основним чинником, який впливав на вибір виду функції рівнів, була впевненість експерта у своїх оцінках. Якщо експерт добре уявляв собі режим споживання потужності в заданому для експертизи вузлі за заданих обставин, то розкид можливих значень потужності $[P_1; P_2]$ задавався ним порівняно

невеликим і обирався лінійний вид функції рівнів (рис. 2). Це відповідало тому, що при збільшенні можливого значення навантаження вузла спочатку нижня, а потім верхня межа впевненості експерта в тому, що ця потужність споживається у вузлі, спадали рівномірно. Якщо ж експерт почував себе невпевнено, тобто мав недостатнє уявлення про режим споживання потужності в заданому вузлі за заданих умов, то він, зазвичай, задавав значно більший розкид можливих значень потужності $[P_{\min}; P_{\max}]$ (рис. 3), який містив деякий “запас на невпевненість”. Вчинити по-іншому експерт не міг тому, що правила експертної процедури вимагали, аби невідоме значення потужності вузла з повною впевненістю утримувалось у заданому діапазоні значень. У цьому разі експерт обирав нормальний вид функції рівнів (рис. 1). Тепер, згідно з інтерпретацією напрямлених рівнів слабкої множини потужності, поблизу значень P_{\min} та P_{\max} гранична впевненість експерта спадала у відповідності до нормальної функції рівнів повільно, що частково компенсувало “зайвий” розкид можливих значень потужності вузла. Дійсно, із рис. 3 видно, що в результаті такого повільного зменшення позитивно напрямлених рівнів на відрізку $[P_{\min}; P_1]$ та негативно напрямлених – на відрізку $[P_2; P_{\max}]$ верхня та нижня межі впевненості експерта залишалися близькими до 100% та 0% відповідно. Водночас на відрізку $[P_1; P_2]$ спад граничної впевненості наближається до лінійного закону, що відповідає властивостям інтегральної функції Гаусса.

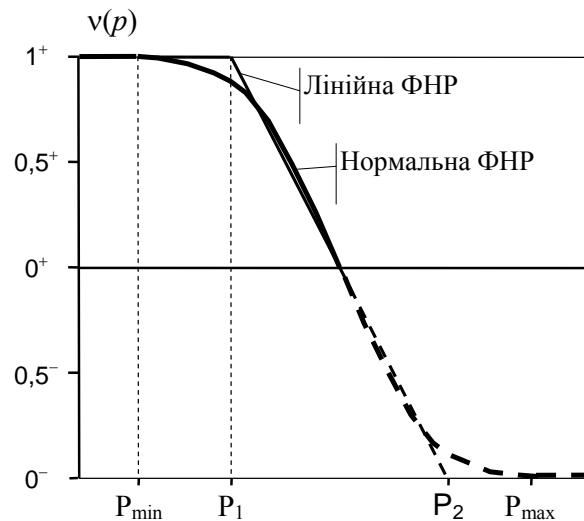


Рис. 3. Лінійна та нормальна функції напрямлених рівнів слабкої множини потужності

Отже, отримані результати та їх аналіз показали, що саме нормальний та лінійний види функцій рівнів слабкої множини потужності вузла електромережі є найбільш природними для процесу експертної оцінки цієї слабкої множини.

Висновки

У роботі, базуючись на результатах проведених теоретичних досліджень та експертних процедур, обґрунтовано загальні принципи побудови функцій рівнів слабких множин потужності вузлів електропостачальних систем. Показано, що в непрямих параметричних експертних процедурах побудови функцій рівнів слабких множин потужності доцільно використовувати функції, які задаються двома параметрами P_{\min} та P_{\max} , розкрито енергетичний зміст цих параметрів. Обґрунтовано, що функції рівнів, які вибирає експерт повинні бути неперервними та строго спадними на інтервалі значень $[P_{\min}; P_{\max}]$. Показано, що в якості таких функцій доцільно використовувати нормальні та лінійні функції рівнів. Отримані результати можуть бути використані в процесі створення непрямих параметричних методів побудови функцій рівнів слабких множин потужності силових елементів електропостачальних систем.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мокін Б. І. Слабкі множини та їх застосування до розв'язання задач прийняття рішень в умовах невизначеності даних / Б. І. Мокін, В. В. Камінський // Вісник ВПІ. – 2004. – № 3. – С. 102 – 108.
2. Мокін Б. І. Слабкі множини як альтернатива нечітким множинам в моделюванні невизначених параметрів складних систем / Б. І. Мокін, В. В. Камінський // Вісник ВПІ. – 2006. – № 6. – С. 226 – 230.
3. Мокін Б. І. Математичне моделювання невизначених параметрів режиму електромереж з допомогою слабких множин / Б. І. Мокін, В. В. Камінський // Вісник ВПІ. – 2005. – № 6. – С. 89 – 96.
4. Модели принятия решений на основе лингвистической переменной / [А. Н. Борисов, А. В. Алексеев, О. А. Крумберг и др.] – Рига: Зинатне, 1982. – 256 с.
5. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / [А. Н. Аверкин, И. З. Батыршин, А. Ф. Блишун, В. Б. Силов, В. Б. Тарасов] / Под. ред. Д. А. Поспелова – М.: Наука, 1986. – 312 с.
6. Мокін Б. І. Геометрична інтерпретація слабких множин та їх систем нечітких реалізацій / Б. І. Мокін, В. В. Камінський // Вісник ВПІ. – 2006. – № 4. – С. 34 – 47.

Мокін Борис Іванович – д. т. н., професор, академік НАПНУ, професор кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів;

Камінський В'ячеслав Вікторович – к. т. н., доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Вінницький національний технічний університет.