

Для определения вероятности аварии была использована гипотетическая статистическая информация, из которой вероятность рассматриваемой аварии равна 0,0164. Тогда

$$P(\text{система неустойчива} | \text{авария на линии}) = 0,239999 \times 0,0164 = 0,003936.$$

Таким образом, предложен методический подход к определению границы ДН региональной ЭЭС, учитывающий вероятностную природу предаварийных состояний по уровню электропотребления. Этот подход по сравнению с детерминистическим позволяет сократить временные затраты на получение результата по обеспечению ДН ЭЭС, что играет важную роль в условиях решения задачи реального времени. В качестве индекса надежности предлагается критическое время отключения к.з., которое представляет собой максимальный временной интервал, необходимый для его успешного отключения с позиций сохранения устойчивой работы всей ЭЭС в целом. В результате проведенного моделирования получено вероятностное распределение критического времени отключения, позволяющее определить, с какой вероятностью энергосистема перейдет в неустойчивый режим, если увеличится время отключения к.з.

1. Li W. Risk assessment of power system. Models, Methods and Applications, 2005. – 335 p.

2. Hsu Yuan-Yih, Chang Chung-Liang. Probabilistic transient stability studies using the conditional probability approach // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. – 1988. – Vol. 3, No.4. – P.1565-1572.

3. Billinton R, Kuruganty P.R.S. A Probabilistic index for transient stability // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. – 1980. – Vol. PAS-99, No.1. – P.195-206.

4. Billinton R, Kuruganty P.R.S. Probabilistic assessment of transient stability in practical multimachine system // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. – 1981. – Vol. PAS-100, No.7. – P.3634-3641.

5. Kuruganty P.R.S., Billinton R. Protection system modeling in a probabilistic assessment of transient stability // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. – 1981. – Vol. PAS-100, No.5. – P.2163-2170.

Получено 08.11.2011

УДК 621.311

Ю.В. ЧЕРНЕЦЬКА, А.І. ЗАМУЛКО, канд. техн. наук  
Національний технічний університет України «КПІ», м.Київ

## **ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ПЛАНІВ ПЕРСПЕКТИВНОГО РОЗВИТКУ РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖ**

Запропоновано нечітку модель оцінювання якості функціонування розподільчої мережі електропередавальної організації, що дозволить підвищити ефективність управлінських рішень щодо розвитку електромереж.

Предложена нечеткая модель оценки качества функционирования распределительной сети электропередающей организации, которая позволяет повысить эффективность управленческих решений в вопросах развития электросетей.

The paper suggested a fuzzy model of an estimation of distribution electricity network performance, which improves the efficiency of management decisions in issues of evolution of electrical grid.

*Ключевые слова:* распределительная электрическая сеть, нечеткая модель.

В умовах старіння основних фондів та невідповідності схем розподільчих електричних мереж (РЕМ) існуючим та прогнозованим рівням навантаження постає питання пошуку шляхів забезпечення ефективного функціонування мереж електропередавальних організацій (ЕПО) України та можливості їх поетапного перспективного розвитку. Управління розвитком РЕМ – складна і багатофакторна процедура, що потребує врахування динаміки попиту та режиму споживання електричної енергії, технічного стану та умов експлуатації об'єктів електромереж, фінансових можливостей компанії тощо; а отже, прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо розвитку РЕМ вимагає розробки узагальнених моделей для проведення оцінки зазначених показників.

На формування математичних моделей суттєво впливають нові умови, в яких працюють ЕПО після реструктуризації галузі. По-перше, стратегія, якої дотримуються компанії в питаннях розвитку мереж, здебільшого полягає у реконструкції та модернізації існуючих об'єктів. По-друге, плани капітальних ремонтів та періодичність міжремонтного контролю фактично визначаються не нормативними документами, а технічним керівником ЕПО залежно від технічного стану та віку електрообладнання.

Враховуючи, що під розвитком слід розуміти перехід від наявного якісного стану до нового, більш досконалого, пов'язаного чи не пов'язаного з кількісним зростанням, управління розвитком РЕМ потребує визначення якості її функціонування. Вирішенню цієї проблеми за допомогою критеріальної моделі присвячена робота [1]. Проте можливість застосування запропонованої моделі для практичних завдань обмежена. По-перше, вона враховує лише дві основні властивості РЕМ – надійність системи та якість електроенергії, і збільшити їх кількість неможливо. По-друге, дана модель вимагає детальної підготовки вхідних даних (інтенсивності відмов та відновлень, ймовірності перебування системи у кожному з можливих робочих і неробочих станів), а на практиці така інформація зазвичай відсутня. Уникнути зазначених недоліків в межах аналітичного моделювання неможливо.

Для складних завдань, що потребують врахування багатьох факто-

рів, у тому числі випадкових та наперед невизначених, розроблені методи імітаційного та нечіткого моделювання. Наприклад, в [2] запропоновано нечітку модель діагностування технічного стану вимикача для експертних систем підтримки прийняття рішень. Очевидною перевагою цієї моделі є можливість прийняття рішень в умовах неповноти і невизначеності вихідної інформації, оперуючи базою знань, що складена на основі нормативної документації і досвіду спеціалістів. Тому можна стверджувати, що для забезпечення ефективного управління розвитком РЕМ необхідним є формування нового погляду на шляхи вирішення цього завдання, у тому числі з використанням сучасних методів нечіткого моделювання.

Метою дослідження є розробка нечіткої моделі оцінювання якості функціонування РЕМ, яка дозволить підвищити ефективність управлінських рішень щодо розвитку електромережі за рахунок комплексного розгляду питань ремонтно-експлуатаційного обслуговування та проектування схеми РЕМ.

Об'єктом оцінювання у дослідженні виступає РЕМ, як сукупність підстанцій, розподільчих установок та електричних ліній, що призначена для розподілу електричної енергії між пунктами споживання. Використовуючи принцип агрегування, за яким будь-яка складна система може бути представлена набором деяких підсистем, РЕМ можна розглядати на різних ієрархічних рівнях:

- *нижній рівень* (обладнання, апаратура та конструкції);
- *середній рівень* (об'єкти РЕМ, фрагменти та вузли РЕМ);
- *верхній рівень* (електрична мережа як єдиний технічний комплекс).

На кожному рівні можна виділити сукупність параметрів, що визначатимуть якість функціонування РЕМ.

Процес моделювання передбачає виконання декількох послідовних дій: конкретизація мети моделювання, розробка моделі, проведення її дослідження та аналіз результатів. Розглянемо послідовно ці етапи.

1. *Конкретизація мети моделювання.* Завдання управління розвитком розуміємо як цілеспрямований вплив на РЕМ з метою підвищення якості її функціонування. Тобто метою моделювання є розрахунок узагальненого показника якості функціонування РЕМ ( $E$ ), який повинен враховувати всі основні особливості та властивості системи, а також умови її роботи та взаємодії із зовнішнім середовищем. В [1] зазначалося, що якість функціонування РЕМ визначається надійністю електропостачання та якістю поставленої електроенергії. Проте є й інші критерії, що відображають, наскільки РЕМ пристосована до виконання завдань (рис.1).

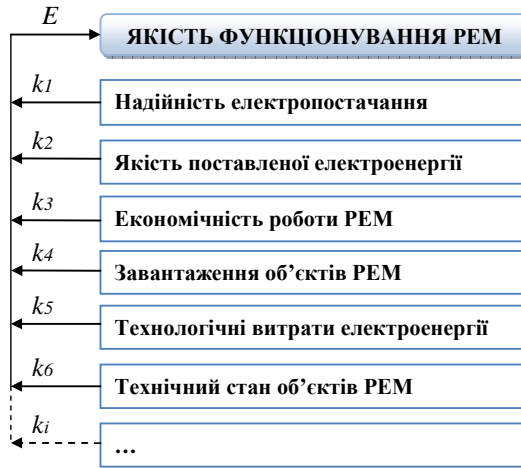


Рис.1 – Визначення узагальненого показника якості функціонування PEM

Важливою властивістю PEM є економічність роботи, тобто результативність використання коштів, що витрачаються для досягнення системою поставлених цілей. У роботі [3] обґрунтовано необхідність врахування технічного стану PEM для завдань управління розвитком. Про якість функціонування PEM так само свідчить рівень технологічних витрат електроенергії на її транспортування [4]. А такий критерій як завантаження мереж характеризує, наскільки повно використовуються наявні у компанії потужності. Перелік критеріїв (рис.1) можна продовжити і «поглибити», виділяючи в межах окремого блоку свої складові. Остаточний склад критеріїв визначає особа, що приймає рішення щодо розвитку PEM.

2. *Розробка нечіткої моделі оцінювання якості функціонування PEM.* За допомогою теорії нечітких множин та нечіткої логіки сформуємо експертну базу правил, яка дозволить зробити висновок про якість функціонування PEM. Для цього необхідно визначити: а) множини вхідних лінгвістичних змінних для кожного з обраних критеріїв  $k_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ); б) множини вихідних лінгвістичних змінних  $E_j$  ( $j = \overline{1, m}$ ) для вихідної змінної  $E$ ; в) множини правил нечітких продукцій, що відображатимуть зв'язок вхідних та вихідної змінних за співвідношеннями:

$$k_1 = F_{k_1}(x_1, \dots, x_{k_1}), k_2 = F_{k_2}(y_1, \dots, y_{k_2}), \dots, k_n = F_{k_n}(z_1, \dots, z_{k_n}),$$

$$E = F_E(k_1, \dots, k_n). \quad (1)$$

Серед існуючих даних для розрахунків вхідних критеріїв  $k_i$  оцінювання якості функціонування РЕМ (рис.1) залишимо дані щодо технічного стану та завантаження об'єктів електричних мереж.

1. *Технічний стан об'єктів електричних мереж* ( $k_1$ ) – це сукупність якісних і кількісних показників, які характеризують експлуатаційну придатність об'єкту порівняно з гранично допустимими значеннями. За результатами оцінювання технічного стану структурні підрозділи ЕПО розробляють плани ремонтно-експлуатаційних робіт. Відповідно до нормативного документу [5], висновок про технічний стан об'єкту РЕМ формується на основі значення коефіцієнту дефектності, а між технічним станом та видами робіт з відновлення РЕМ введено наступну відповідність: добрий технічний стан – підлягає технічному обслуговуванню; задовільний технічний стан – підлягає капітальному ремонту; незадовільний технічний стан – підлягає реконструкції; непридатний технічний стан – підлягає повній заміні.

Отже, в якості терм-множин лінгвістичних змінних  $(x_1, \dots, x_{k_1})$  критерію «технічний стан» пропонуємо використати вже усталені характеристики: «добрий», «задовільний», «незадовільний» та «непридатний».

2. *Завантаження об'єктів електричних мереж* ( $k_2$ ) – це критерій, що відображає наскільки встановлені потужності РЕМ відповідають існуючим рівням навантаження по території обслуговування ЕПО і розраховується за даними режимних замірів. Відповідно до значення коефіцієнту завантаження керівництво ЕПО може приймати рішення про збільшення пропускну здатності окремих ділянок мереж, зміну встановленої потужності трансформаторів тощо, тобто цей показник є одним з основних для проектування схеми РЕМ. Оптимальним рівнем завантаження об'єктів електричних мереж вважають 70%. Якщо завантаження значно перевищує цей поріг, виникає загроза порушення сталості роботи електричних мереж у аварійних та ремонтних режимах. Недовантаження (менше 40%) також негативно впливає на якість функціонування РЕМ, адже спричиняє зростання технологічних витрат на розподіл електроенергії у мережах. Отже, у якості терм-множин лінгвістичних змінних  $(y_1, \dots, y_{k_2})$  критерію «завантаження» пропонуємо використати характеристики: «недовантажений», «мало завантажений», «оптимально завантажений» та «максимально завантажений».

Відзначимо, що саме поєднання серед вхідних критеріїв показників технічного стану та завантаження об'єктів електричних мереж забезпе-

чить комплексний розгляд питань ремонтно-експлуатаційного обслуговування та проектування схеми РЕМ.

Для вихідного показника «якість функціонування РЕМ» ( $E$ ) пропонуємо п'ять терм-множин лінгвістичних змінних: «дуже низька», «низька», «середня», «висока» та «дуже висока». Ця шкала досить проста, зрозуміла і легка для оцінювання.

Для реалізації процесу нечіткого моделювання використаємо середовище MATLAB та його розширення Fuzzy Logic Toolbox.

На рис.2 наведено функції приналежності терм-множин вхідних та вихідної змінних, складені на основі розглянутих вище суджень.

База правил містить комбінації сполучень показників технічного стану та завантаження об'єктів РЕМ і відповідні висновки про якість функціонування. Використання логічних змінних робить опис моделі максимально зрозумілим. Правила формуються за схемою: «**If** (тех-стан **is** добрий) **and** (завантаження **is** недовант) **then** (якість-функціонування **is** середня) (1)».

У дужках можна вказати ваговий коефіцієнт, який відобразить наскільки експерт упевнений у справедливості цього правила. Враховуючи, що для оцінки використано два критерії з чотирма характеристиками для кожного, загальна кількість правил у нашій моделі – 16. Звичайно, якщо збільшити кількість вхідних змінних, кількість правил зросте, проте це не вплине на можливість програми виконати розрахунки.

Нечіткий висновок формується за алгоритмом Мамдані, який є одним з перших, що знайшов практичне застосування. Графічне зображення поверхні нечіткого висновку (рис.3) дозволяє візуалізувати графіки залежності вихідної змінної від окремих вхідних.

3. *Проведення дослідження моделі та аналіз результатів.* Для перевірки адекватності розробленої моделі проведемо розрахунки для кількох ЕПО України (таблиця). Якщо порівнювати компанії між собою, то найнижча якість функціонування РЕМ у ЕПО<sub>3</sub> через недовантаженість РЕМ.

Розрахунок якості функціонування РЕМ

Електропередавальна організація	Коефіцієнт дефектності ( $k_1$ ), %	Завантаження ( $k_2$ ), %	Якість функціонування ( $E$ )
ЕПО <sub>1</sub>	14,2	41,4	0,425 (середня)
ЕПО <sub>2</sub>	4,1	60,2	0,649 (висока)
ЕПО <sub>3</sub>	6,9	38,0	0,364 (низька)

У даному випадку РЕМ розглядалася на верхньому ієрархічному рівні, тобто як єдиний технічний комплекс мереж 110 кВ окремої ЕПО.

Виконуючи розрахунки на інших ієрархічних рівнях, можна детальніше проаналізувати ситуацію у сітьовому комплексі кожної компанії.

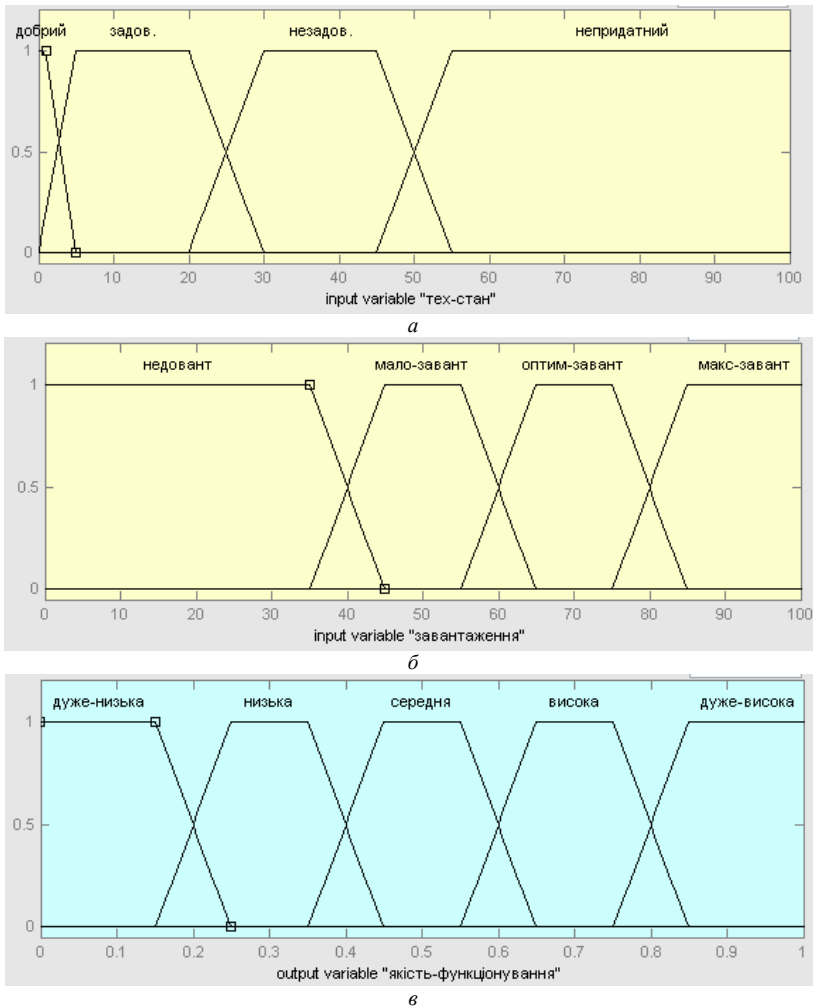


Рис.2 – Функції приналежності для вхідних змінних:

*а* – «технічний стан»; *б* – «завантаження»; *в* – вихідної змінної «якість функціонування».

Таким чином, використовуючи алгоритми нечітких множин та нечіткої логіки, можна досягти більш обґрунтованих рішень щодо розвитку РЕМ за рахунок формалізації процедури оцінювання якості її функці-

онування. При розрахунку узагальненого показника якості функціонування РЕМ важливим є комплексний розгляд питань ремонтно-експлуатаційного обслуговування та проектування схеми електромереж. Тому у запропонованій нечіткій моделі враховано критерії технічного стану та завантаження об'єктів електричних мереж. Перелік показників для оцінки може доповнюватися і розширюватися (рис.1). Крім того, до переваг запропонованого підходу можна віднести можливість розгляду РЕМ як об'єкту оцінювання на різних ієрархічних рівнях та автоматизоване виконання розрахунків у середовищі MATLAB.

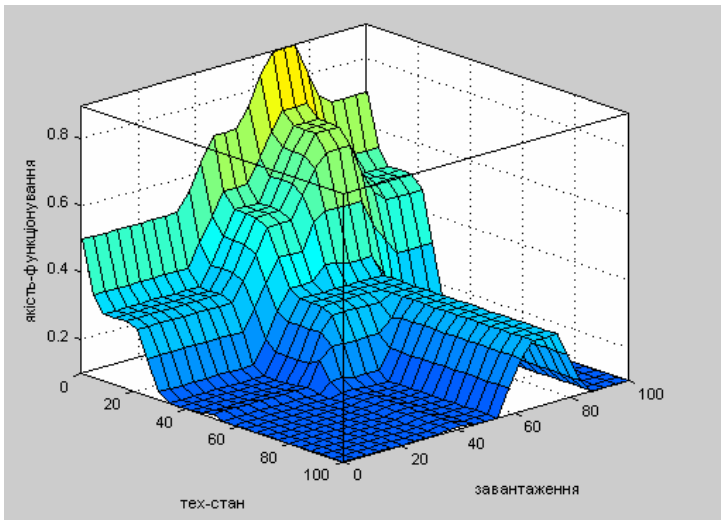


Рис.3 – Поверхня нечіткого висновку для розробленої нечіткої моделі

Запропонована нечітка модель оцінювання якості функціонування РЕМ може бути використана ЕПО при формуванні планів перспективного розвитку мереж для виявлення вузьких місць, що в свою чергу дозволить оптимізувати використання коштів на відновлення.

1.Лежнюк П.Д. Кількісна оцінка якості функціонування розподільної електричної мережі за допомогою критеріальної моделі [Електронний ресурс] / П.Д. Лежнюк, В.М. Лагутін, В.О. Комар // Наукові праці Вінницького нац. техн. ун-ту. – 2008. – № 4. – Режим доступу: [http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-4/2008-4.files/uk/08pdlhcm\\_uk.pdf](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-4/2008-4.files/uk/08pdlhcm_uk.pdf).

2.Бардик Є.І. Нечіткі моделі оцінки післяремонтного технічного стану і прогнозування залишкового ресурсу високовольтних вимикачів [Електронний ресурс] / Є.І. Бардик, М.В. Костерев, І.С. Федосов // Пленарні доповіді XI Міжн. наук.-техн. конф. «Проблеми сучасної електротехніки - 2010». – Режим доступу: [http://fel.kpi.ua/ppedisc/doc/s2/2\\_20.pdf](http://fel.kpi.ua/ppedisc/doc/s2/2_20.pdf).



3.Чернецька Ю.В. Система моніторингу технічного стану розподільчих електричних мереж / Ю.В. Чернецька, А.І. Замулко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. – №9. – С.28-37.

4.Замулко А.І. Питання підвищення ефективності функціонування електричних мереж електропередавальних організацій України / А.І. Замулко, Ю.В. Солоха, Я.В. Бовкун // Вісн. Черніг. держ. технолог. ун-ту. – 2010. – №42. – С.176-181.

5.Методичні вказівки з обліку та аналізу в енергосистемах технічного стану розподільчих мереж напругою 0,38-20 кВ з повітряними лініями електропередачі : СОУ-Н МПЕ 40.1.20.576:2005. – Офіц. вид. – К.: ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2005. – 92 с.

*Отримано 08.11.2011*

УДК 621.311.019.3

Ю.Я.ЧУКРЕЕВ, д-р техн. наук, М.Ю.ЧУКРЕЕВ, канд. техн. наук  
*Учреждение Российской академии наук Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми научного центра УрО РАН, г.Сыктывкар*

## **МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФИЦИТА МОЩНОСТИ В ЗАДАЧАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БАЛАНСОВОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Представлены особенности модельного обеспечения оценки показателей балансовой надежности ЭЭС для условий реструктуризации электроэнергетики России. Обоснована линейная постановка задачи распределения дефицита мощности.

Надано особливості модельного забезпечення оцінки показників балансової надійності ЕЕС для умов реструктуризації електроенергетики Росії. Обґрунтована лінійна постановка задачі розподілу дефіциту потужності.

Paper presents power system adequacy assessment model features in restructuring conditions of Russian power industry. Linear problem statement for power imbalance distribution issue has been justified.

*Ключевые слова:* электроэнергетическая система, балансовая надежность, дефицит мощности, модель потокораспределения.

Опыт реформирования электроэнергетики в разных странах показывает, что введение механизмов конкуренции может негативно сказаться на надежности энергоснабжения потребителей. Это происходит по многим причинам [1], из которых основными являются две:

– снижение мотивации в развитии достаточных для поддержания надежности резервных мощностей и системообразующих связей в условиях долгосрочного планирования и снижение мотивации поддержания вращающегося резерва мощности в условиях эксплуатации;

– усложнение и утяжеление режимов работы электроэнергетических систем вследствие введения конкурентных договорных отношений между субъектами рынка, недостаточной проработанности принципов