



ЛІТВИНОВ В.В., канд. техн. наук, начальник ВТС Дніпровської ГЕС
ПАТ "Укргідроенерго"; доцент кафедри гідроенергетики
Запорізької державної інженерної академії
КОТЕЛЕВСЬКА І.Г., магістрант кафедри гідроенергетики
Запорізької державної інженерної академії

ВИЗНАЧЕННЯ СЛАБКИХ ЕЛЕМЕНТІВ МЕРЕЖІ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ ГЕС В УМОВАХ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ВИБОРУ

В статті розв'язано задачу визначення слабких елементів мережі власних потреб ГЕС з урахуванням режимної надійності та технічного стану обладнання з використанням методів нечіткої кластеризації. Розроблено метод інтервальної ідентифікації коефіцієнтів статичних характеристик навантаження для проведення оцінки режимної надійності мережі власних потреб ГЕС. Запропоновано нечітку модель для оцінювання технічного стану кабельних мереж в умовах обмеженості діагностичної інформації.

Ключові слова: власні потреби, слабкий елемент, технічний стан, імовірність відмови, статична характеристика навантаження, кластеризація.

Вступ. Однією з умов живучості гідравлічної електростанції (ГЕС) є надійне функціонування обладнання її власних потреб. Для цього необхідна надійна та стійка робота електричної мережі власних потреб. Сучасні режими роботи електричних мереж та обладнання власних потреб ГЕС є достатньо напруженими через наявність наступних факторів [1]:

- 1) застаріле електрообладнання (трансформатори, вимикачі) та кабельне господарство;
- 2) підключення додаткових споживачів власних потреб протягом терміну експлуатації до існуючих вузлів електричної мережі без урахування номінальних параметрів існуючого обладнання, що часто призводить до його перевантаження;
- 3) робота в повторно-короткочасному режимі потужних асинхронних двигунів (насоси МНУ, компресори систем стиснутого повітря, тощо);
- 4) повільні темпи реконструкції та обмежене фінансування ремонту мереж власних потреб ГЕС.

В умовах обмеженості фінансування для найбільш ефективного використання коштів, призначених на реконструкцію (ремонт) мереж власних потреб, необхідно знати, які елементи мережі є найбільш слабкими та потребують першочергової заміни. Слабкі елементи мережі власних потреб необхідно визначати як з точки зору режиму, так і з точки зору технічного стану її елементів. Визначення слабких елементів (або групи елементів) мережі власних потреб ГЕС є складною задачею через різноманітність критеріїв оцінювання слабкості (електричний режим, технічний стан та ін.) та доцільність поєднання найбільш слабких та пов'язаних електрично елементів в групи (кластери).

Постановка задачі. Для визначення слабких елементів мережі власних потреб ГЕС з урахуванням технічного та режимного стану спочатку треба вирішити дві задачі:

- 1) отримати кількісну оцінку режимної надійності роботи споживачів мережі власних потреб;
- 2) визначити імовірності відмови елементів мережі власних потреб (трансформатори, кабелі, вимикачі).

Для вирішення першої задачі необхідно проведення аналізу режимів роботи мережі власних потреб ГЕС. Оскільки відсоток двигунового навантаження у складі власних потреб ГЕС не є значним (на відміну від теплових та атомних станцій), питання динамічної стійкості навантаження та самозапуску двигунів не є визначальним. Найбільший інтерес представляє дослідження статичної стійкості з точки зору можливості виникнення процесу лавини напруги у випадку зниження напруги у вузлі приєднання мережі власних потреб. Для цього необхідний розрахунок усталеного режиму мережі власних потреб ГЕС. Достовірність результатів моделювання усталених режимів мережі власних потреб ГЕС залежить, в першу чергу, від правильності представлення електричного навантаження (споживачів).

З урахуванням особливостей функціонування мережі власних потреб ГЕС представлених в [1], а саме: відсутності дольової переваги одного з типів навантаження, роботи більшості двигунового навантаження в повторно-короткочасному режимі, залежності режиму роботи мережі власних потреб від режиму роботи ГЕС, доцільно використовувати заміну реальних споживачів еквівалентними статичними характеристиками навантаження [2] з коефіцієнтами, які змінюються у певному інтервалі [1, 3].

Для вирішення другої задачі необхідно визначити технічний стан елементів, з яких формується мережа власних потреб ГЕС з використанням інформації, яку можна отримати під час експлуатації в режимі "on-line" та за даними періодичних перевірок обладнання. За отриманими даними про технічний стан елементів за методом, викла-



деним в [4], визначається імовірність відмови обладнання на інтервалі часу з урахуванням статистичної інформації про функціонування обладнання даного типу.

Визначення підмножини (кластеру) слабких елементів мережі власних потреб ГЕС, які потребують першочергової заміни, необхідно виконати за двома критеріями, які не мають чітко вираженого аналітичного зв'язку. Крім того, треба врахувати прив'язки обладнання до вузла або до гілки мережі власних потреб. Таким чином, задача визначення груп слабких елементів для найбільш ефективної їхньої заміни містить велику кількість невизначеностей, що ускладнює її вирішення як задачі детермінованої класифікації. В таких умовах найбільш умісним підходом до визначення груп слабких елементів ЕЕС є нечітка кластеризація [5].

Кластеризація – це об'єднання об'єктів в групи (кластери) на основі схожості ознак для об'єктів однієї групи і відмінностей між групами [5]. Існує ряд методів кластеризації, які поділяються на чіткі та нечіткі. Чіткі методи кластеризації розбивають множину об'єктів M на декілька множин, що не перетинаються. При цьому будь-який об'єкт з M належить тільки до одного з n кластерів. Нечіткі методи кластеризації дозволяють одному й тому самому об'єкту одночасно належати декільком кластерам з певною ступінню приналежності. Для задачі визначення слабких елементів електричної мережі ця кластеризація є більш природною, оскільки дозволяє врахувати невизначеності при оцінюванні стану об'єктів та режиму мережі [6].

Оцінювання режимної надійності мережі власних потреб ГЕС. Важливим критерієм оцінювання режимної надійності мережі власних потреб ГЕС, у якій двигуни не складають переважну більшість навантаження, є статична стійкість та регульовальний ефект навантаження (РЕН). Для кількісного оцінювання статичної стійкості вузла мережі власних потреб ГЕС та визначення РЕН його навантаження доцільно використовувати критерій $dQ/dU < 0$ [7].

Величина dQ/dU дорівнює похідній небалансу реактивної потужності за напругою у вузлі навантаження мережі. Під Q розуміється різниця між реактивною потужністю, що надходить у вузол навантаження, і витікає з нього: $Q = Q_{ген} - Q_{сп}$. Оскільки реактивна потужність надходить до вузла мережі власних потреб з шин станції, які для системи власних потреб є джерелом нескінченної потужності, то має сенс розглядати тільки характеристику споживання $Q_{сп}$ та на її підставі виконати кількісну оцінку РЕН, причому позитивний РЕН буде за умови:

$$\frac{dQ}{dU} < 0 \Rightarrow \frac{d(-Q_{сп})}{dU} < 0 \Rightarrow \frac{dQ_{сп}}{dU} > 0. \quad (1)$$

Для використання критерію (1) для кількісного оцінювання РЕН мережі власних потреб ГЕС необхідно знати вираз статичної характеристики навантаження $Q(U)$. Розглянемо вузол мережі власних потреб ГЕС, про який відомо, що в ньому знаходиться різноманітне навантаження, яке значно змінюється в часі через повторно-короткочасний режим роботи обладнання. Через те що склад навантаження постійно змінюється, коефіцієнти, що входять у вирази для статичних характеристик навантаження [1, 2], також змінюються у певному інтервалі. Для визначення цих інтервалів доцільно представити статичні характеристики навантаження наступним чином:

$$P = P_0(a_0 + a_1U + a_2U^2) = d_0 + d_1U + d_2U^2; \quad (2)$$

$$Q = Q_0(b_0 + b_1U + b_2U^2) = f_0 + f_1U + f_2U^2. \quad (3)$$

Інтервальні коефіцієнти при цьому описуються парами чисел: $D_0 = (d_0, e_0)$, $D_1 = (d_1, e_1)$, $D_2 = (d_2, e_2)$, $F_0 = (f_0, g_0)$, $F_1 = (f_1, g_1)$, $F_2 = (f_2, g_2)$, де $d_0, d_1, d_2, f_0, f_1, f_2$ – значення середини інтервалів, $2e_0, 2e_1, 2e_2, 2g_0, 2g_1, 2g_2$ – значення ширини інтервалів.

З урахуванням інтервальних коефіцієнтів вирази (2), (3) приймають значення:

$$P = D_0 + D_1U + D_2U^2, \quad (4)$$

$$Q = F_0 + F_1U + F_2U^2. \quad (5)$$

Для визначення інтервальних коефіцієнтів використовується наступна режимна інформація [1]:

- залежність напруги у вузлі навантаження від часу $U(t)$;

- залежність активної потужності, що споживається у вузлі навантаження, від часу $P(t)$;

- залежність реактивної потужності, що споживається у вузлі навантаження, від часу $Q(t)$.

Наявна режимна інформація про вузли навантаження дозволяє сформулювати наступні цільові функції [1]:

$$F_p = e_0n + e_1 \sum_{i=1}^N U_i + e_2 \sum_{i=1}^N U_i^2 \rightarrow \min, \quad (6)$$

$$F_Q = g_0n + g_1 \sum_{i=1}^N U_i + g_2 \sum_{i=1}^N U_i^2 \rightarrow \min. \quad (7)$$

Сформовані цільові функції представляють собою задачу лінійного програмування з обмеженнями. Обмеження цільової функції F_p :

$$d_0 + d_1U_i + d_2U_i^2 + e_0 + e_1U_i + e_2U_i^2 \geq P_i, \quad i = 1, \dots, n;$$

$$d_0 + d_1U_i + d_2U_i^2 - e_0 - e_1U_i - e_2U_i^2 \leq P_i, \quad i = 1, \dots, n;$$

$$0,7 \max\{P_i\} \leq d_0 \leq -0,5 \max\{P_i\};$$



$$\begin{aligned} 1,5 \max\{P_i\} &\geq d_1 \geq 0,3 \max\{P_i\}; \\ 0,5 \max\{P_i\} &\geq d_2 \geq 0; \\ e_0 &\geq 0; e_1 \geq 0; e_2 \geq 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Обмеження цільової функції F_Q :

$$\begin{aligned} g_0 + g_1 U_i + g_2 U_i^2 + f_0 + f_1 U_i + f_2 U_i^2 &\geq Q_i, i = 1, \dots, n; \\ g_0 + g_1 U_i + g_2 U_i^2 - f_0 - f_1 U_i - f_2 U_i^2 &\leq Q_i, i = 1, \dots, n; \\ 13,1 \max\{Q_i\} &\leq g_0 \leq -5,4 \max\{Q_i\}; \\ -14,4 \max\{Q_i\} &\geq g_1 \geq -26,2 \max\{Q_i\}; \\ 14,1 \max\{Q_i\} &\geq g_2 \geq 9,6 \max\{Q_i\}; \\ f_0 &\geq 0; f_1 \geq 0; f_2 \geq 0. \end{aligned} \quad (9)$$

В сформованих оптимізаційних задачах кількість обмежень дорівнює $2(2N + 9)$. Таким чином, ці оптимізаційні задачі мають складну структуру через велику кількість обмежень у вигляді нерівностей. В цих умовах, для розв'язання отриманих задач лінійного програмування застосовано генетичний алгоритм [1, 5], який дає задовільні результати в задачах з великою кількістю обмежень у формі нерівностей [3].

На отриманих інтервалах зміни коефіцієнтів для параметрів режиму мережі власних потреб в будь-який момент часу можна визначити дискретні значення коефіцієнтів та записати вирази $P(U)$, $Q(U)$ для поточного складу навантаження та виконати оцінку РЕН за критерієм (1). Ця задача є зворотною до попередньої та записується наступним чином:

$$\begin{aligned} P(t_1) &= D_0 + D_1 U(t_1) + D_2 U^2(t_1); \\ d_0 + e_0 &\geq D_0 \geq d_0 - e_0; \quad d_1 + e_1 \geq D_1 \geq d_1 - e_1; \\ d_2 + e_2 &\geq D_2 \geq d_2 - e_2; \quad (10) \\ Q(t_1) &= F_0 + F_1 U(t_1) + F_2 U^2(t_1); \\ f_0 + g_0 &\geq F_0 \geq f_0 - g_0; \quad f_1 + g_1 \geq F_1 \geq f_1 - g_1; \\ f_2 + g_2 &\geq F_2 \geq f_2 - g_2; \quad (11) \end{aligned}$$

Кількісна оцінка РЕН виконується шляхом диференціювання цільової функції (11) в фіксований момент часу t за напругою U .

Оцінювання технічного стану та імовірності відмови елементів мережі власних потреб ГЕС. При оцінці імовірності відмови електрообладнання вузла мережі власних потреб ГЕС на інтервалі часу з урахуванням його стану необхідно знати функцію розподілу імовірності відмови конкретної одиниці обладнання $F(t)$. Для формування цієї функції $F(t)$ з урахуванням індивідуальних характеристик обладнання необхідне врахування наступних факторів [4]:

- працездатний стан електрообладнання в момент часу нагляду t_1 ;
- технічний стан окремої одиниці обладнання.

Доцільність використання статистичних даних пояснюється тим, що вони враховують всі експлуатаційні фактори, в тому числі і вплив навколишнього середовища. Отримана в результаті обробки статистичних даних функція розподілу імовірності події базується на генеральній сукупності подій і не є імовірнісною характеристикою окремої одиниці обладнання. Для визначення імовірнісних характеристик окремого елемента на інтервалі часу необхідна модифікація статистичної функції $F(t)$ з урахуванням його фактичного технічного стану. Із статистичної функції $F(t)$ визначається імовірність відмови розгляданого обладнання на інтервалі часу Δt за умови, що в момент часу t_1 елемент знаходився у працездатному стані. Для конкретного об'єкта функція $F(t)$ буде відрізнятись внаслідок індивідуальних факторів експлуатації і зовнішніх впливів. Безумовна імовірність відмови об'єкта на інтервалі часу $\Delta t = t_2 - t_1$ за умови його працездатного стану на момент часу t визначається з функції $F(t)$:

$$p(H_1) = \frac{F(t_2) - F(t_1)}{1 - F(t_1)}, \quad (12)$$

де H_1 – подія, яка полягає в тому, що об'єкт відмовив на інтервалі часу Δt .

Імовірність відмови окремої одиниці обладнання на інтервалі часу Δt залежить від його стану до моменту нагляду t_1 (чим більш зношеним є елемент електрообладнання, тим вища імовірність його відмови). В якості міри індивідуальної оцінки стану об'єкта прийнято технічний стан S , визначений за нечіткою моделлю об'єкта, представленою в [8]. Для визначення імовірності відмови окремої одиниці обладнання з урахуванням її технічного стану введено наступні визначення подій:

B – подія, яка полягає в тому, що об'єкт до моменту часу t_1 мав ТС S ;

H_2 – подія, яка полягає в тому, що об'єкт не відмовив на інтервалі часу Δt , при цьому $p(H_2) = 1 - p(H_1)$.

Подія B може спостерігатися в одній з двох несумісних подій H_1 та H_2 , тобто при відмові об'єкта на інтервалі часу Δt , так і при відсутності відмови. В цьому випадку, імовірність відмови об'єкта на інтервалі часу Δt за умови, що в об'єкті було зафіксовано ТС S , визначається за формулою Байєса [9]:

$$p(H_1 / B) = \frac{p(H_1)p(B / H_1)}{p(H_1)p(B / H_1) + p(H_2)p(B / H_2)}. \quad (13)$$

Для визначення технічного стану S необхідно мати нечіткі моделі оцінювання стану відповідного обладнання. Основним обладнанням мережі



власних потреб ГЕС є – силові трансформатори; високовольтні вимикачі; силові кабелі.

Моделі для оцінювання технічного стану силових трансформаторів розроблені в [8], а високовольтних вимикачів – в [4]. Оцінювання технічного стану кабелів відбувається в умовах обмеженої кількості вхідних ознак, які визначають їхній ресурс, а також за відсутності аналітичних зв'язків між окремими діагностичними ознаками. Крім того, діагностичні ознаки для оцінювання технічного стану кабелю поділяються на дві групи:

- параметри, що можна визначити в режимі "on-line" без виведення кабельної лінії в ремонт;
- параметри, що визначаються під час високовольтних випробувань кабелю.

З урахуванням наявних невизначеностей для оцінки стану силових кабелів доцільно використати нечітку модель типу Мамдані з лінгвістичною базою правил прийняття рішення. Під час періодичних перевірок силового кабелю виконується перевірка опору ізоляції, визначення струмів витоку, а також випробування кабелю підвищеною напругою. До характеристик, що можна оцінити в режимі "on-line", відносяться коефіцієнт завантаження кабелю та температура кабелю. Враховуючи наявність двох груп характеристик стану запропоновано дворівневу нечітку модель, яка використовує в якості вхідних величин першого рівня параметри, які можна виміряти та визначити за допомогою наявних засобів вимірювання без виведення захисту в ремонт та параметри, що вимірюються під час періодичних перевірок. Вихідні величини (локальні характеристики стану) першого рівня є вхідними величинами другого рівня, який визначає загальний стан об'єкта. Структурна схема запропонованої нечіткої моделі представлена на Рис. 1.

З урахуванням наявної інформації, в якості вхідних лінгвістичних змінних нечіткої моделі обрано:

1) величини, що вимірюються в режимі "on-line":

- А – "Коефіцієнт завантаження кабелю";
- В – "Температура кабелю".

2) Величини, що визначаються під час випробувань: С – "Опір ізоляції"; D – "Випробувальна напруга"; Е – "Струми витоку".

Для кожної лінгвістичної змінної введені наступні нечіткі терми: А: A_1 – "Припустимий", A_2 – "Неприпустимий"; В: B_1 – "Нормальна", B_2 – "Висока"; С: C_1 – "Нормальний", C_2 – "Низький"; D: D_1 – "Занижена", D_2 – "Нормативна"; Е: E_1 – "Малі", E_2 – "Великі".

В якості вихідної змінної моделі першого рівня для оцінювання стану кабелю за результатами "on-line" спостережень прийнято величину S_1 , а в якості вихідної змінної моделі другого рівня для оцінювання стану за результатами періодичних випробувань – величину S_2 . Вихідною величиною другого рівня нечіткої моделі є загальний технічний стан кабелю S .

Для побудови функцій приналежності (ФП) нечітких термів вхідних величин за відсутності статистичних даних проведено опитування експертів. Найбільш підходящою апроксимацією отриманих експертних оцінок є ФП Гаусового типу. Аналітичні вирази ФП, побудовані за експертними оцінками, для забезпечення прозорості та несуперечності нечіткої моделі на інтервалах приналежності визначаються за допомогою правила Руспіні, яке полягає в тому, що сума ступенів приналежності кожного значення вхідної змінної по всім термам має становити повну групу несумісних подій [5]:

$$\sum_{i=1}^n \mu_i(x) = 1; \forall x, \quad (14)$$

де n – число всіх термів лінгвістичних змінних. Аналітичні вирази ФП, побудовані з урахуванням (14), представлені в Табл. 1.

Вихідні множині станів кабелю першого рівня моделі описано наступними лінгвістичними змінними: S_1 = "Технічний стан за параметрами он-лайн" та S_2 = "Технічний стан за результати періодичних випробувань". Терми вихідних змінних (D = "Добрий", C = "Середній", P = "Поганий") та їхні інтервали визначено з використанням інтервалів стандартної шкали Харрінгтона [10].

Аналітичні вирази ФП термів вихідної змінної нечіткої моделі першого рівня матимуть наступний вигляд:

$$\mu_D(S) = \begin{cases} 1; S > 0,8; \\ 1 - (0,8 - S) / 0,3; 0,5 \leq S \leq 0,8; \\ 0; s < 0,5; \end{cases} \quad (15)$$

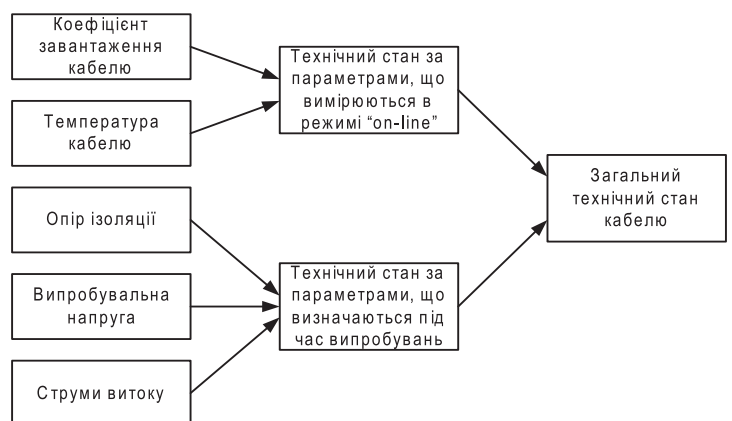


Рис. 1. Структурна схема нечіткої моделі для оцінки технічного стану кабелю



$$\mu_C(S) = \begin{cases} 1 - (s - 0,5) / 0,3; & 0,5 \leq S \leq 0,8; \\ 1 - (0,5 - S) / 0,3; & 0,5 \geq S \geq 0,2; \\ 0; & 0,2 < s > 0,8; \end{cases} \quad (16)$$

$$\mu_{II}(S) = \begin{cases} 1; & S \leq 0,2; \\ 1 - (S - 0,2) / 0,3; & 0,2 \leq S \leq 0,5; \\ 0; & s > 0,5. \end{cases} \quad (17)$$

На другому рівні нечіткої моделі, вихідну множини станів силового кабелю описано лінгвістичною змінною S = "Загальний технічний стан кабелю", яка складається з п'яти термів: $ДД$ = "Дуже добрий", $Д$ = "Добрий", $С$ = "Середній", $П$ = "Поганий", $ДП$ = "Дуже поганий". Функції приналежності термів вихідної змінної також визначено за стандартними відмітками вербально-числової шкали Харрінгтона:

$$\mu_{ДД}(S) = \begin{cases} 1; & S > 0,9; \\ 1 - (0,9 - S) / 0,18; & 0,72 \leq S \leq 0,9; \\ 0; & s < 0,72; \end{cases} \quad (18)$$

$$\mu_D(S) = \begin{cases} 1 - (S - 0,72) / 0,18; & 0,72 \leq S \leq 0,9; \\ 1 - (0,72 - S) / 0,22; & 0,72 \geq S \geq 0,5; \\ 0; & 0,5 < s > 0,9; \end{cases} \quad (19)$$

$$\mu_C(S) = \begin{cases} 1 - (S - 0,5) / 0,22; & 0,5 \leq S \leq 0,72; \\ 1 - (0,5 - S) / 0,22; & 0,5 \geq S \geq 0,28; \\ 0; & 0,28 < s > 0,72; \end{cases} \quad (20)$$

$$\mu_{II}(S) = \begin{cases} 1 - (S - 0,28) / 0,22; & 0,28 \leq S \leq 0,5; \\ 1 - (0,28 - S) / 0,18; & 0,28 \geq S \geq 0,1; \\ 0; & 0,1 < s > 0,5; \end{cases} \quad (21)$$

$$\mu_{ДП}(S) = \begin{cases} 1; & S < 0,1; \\ 1 - (S - 0,1) / 0,18; & 0,1 \leq S \leq 0,28; \\ 0; & s > 0,28. \end{cases} \quad (22)$$

За якісними оцінками експерта у вигляді висловлювань типу "ЯКЩО-ТО" сформовані бази правил нечітких модулів першого рівня. Вони приведені в Табл. 2, 3.

За аналогічним підходом сформовано базу правил для оцінки загального стану кабелю. Вона приведена у Табл. 4.

Нечіткий вивід (дефазифікація) виконується за центроїдним методом [5].

За отриманою за нечіткою моделлю кількісною характеристикою технічного стану обладнання S з використанням нечіткого виводу Заде [4, 5] визначаються умовні імовірності $p(B/H_1)$ та $p(B/H_2)$ після чого за виразом (13) обчислюється імовірність відмови окремої одиниці обладнання на інтервалі часу Δt .

Визначення слабких елементів мережі власних потреб ГЕС за алгоритмом с-середніх. Для виявлення слабких елементів мережі власних потреб використано алгоритм с-середніх [5], який

Таблиця 1. ФП вхідних змінних моделі оцінки стану кабелю

Лінгвістична змінна	ФП нечітких термів	
A = «Коефіцієнт завантаження»	$\mu_{A1}(A) = 1 - e^{-\frac{(A-0,8)^2}{2 \cdot 0,132^2}}$	$\mu_{A2}(A) = e^{-\frac{(A-0,8)^2}{2 \cdot 0,132^2}}$
B = «Температура кабелю»	$\mu_{B1}(B) = 1 - e^{-\frac{(B-150)^2}{2 \cdot 38^2}}$	$\mu_{B2}(B) = e^{-\frac{(B-150)^2}{2 \cdot 38^2}}$
C = «Опір ізоляції»	$\mu_{C1}(C) = e^{-\frac{(C-1,2)^2}{2 \cdot 0,228^2}}$	$\mu_{C2}(C) = 1 - e^{-\frac{(C-1,2)^2}{2 \cdot 0,228^2}}$
D = «Випробувальна напруга»	$\mu_{D1}(D) = 1 - e^{-\frac{(D-10)^2}{2 \cdot 1,375^2}}$	$\mu_{D2}(D) = e^{-\frac{(D-10)^2}{2 \cdot 1,375^2}}$
E = «Струми витоку»	$\mu_{E1}(E) = e^{-\frac{(E-200)^2}{2 \cdot 50^2}}$	$\mu_{E2}(E) = 1 - e^{-\frac{(E-200)^2}{2 \cdot 50^2}}$

Таблиця 2. База правил для оцінки стану кабелю в режимі "on-line"

$t_{\text{каб}}^c$ \ Kзав	Допуст.	Недоп.
	Норм	Д
Висока	П	П

Таблиця 3. База правил для оцінки стану кабелю за результатами періодичних випробувань

$R_{\text{гол}} = \text{«Нормальний»}$			$R_{\text{гол}} = \text{«Низький»}$		
$I_{\text{вит}}$ \ $U_{\text{вит}}$	Заниж.	Нормат.	$I_{\text{вит}}$ \ $U_{\text{вит}}$	Заниж.	Нормат.
Великі	П	П	Великі	П	П

Таблиця 4. База правил для оцінки загального технічного стану кабелю

$S_{\text{вб}}$ \ $S_{\text{on-line}}$	Д	С	П
	Д	ДД	Д
С	Д	С	П
П	П	П	ДП

дає можливість знайти оптимальний розподіл елементів по кластерам за будь-якої початкової матриці нечіткого розбиття. З отриманих за критерієм dQ/dU кількісних значень РЕН формується вектор режимного стану обладнання P_1 :

$$P_1 = [p_{11} \dots p_{1i} \dots p_{1n}]^T. \quad (23)$$

З отриманих імовірностей відмови обладнання мережі власних потреб ГЕС на інтервалі часу формується вектор технічного стану обладнання P_2 :

$$P_2 = [p_{21} \dots p_{2i} \dots p_{2n}]^T. \quad (24)$$

З отриманих векторів P_1 та P_2 формується матриця об'єктів кластеризації X :

$$X = \begin{bmatrix} p_{11} & \dots & p_{1i} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & \dots & p_{2i} & \dots & p_{2n} \end{bmatrix}^T. \quad (25)$$

Визначаються нечіткі кластери $C = \{c_1 \dots c_i \dots c_m\}$, (m – кількість кластерів), експоненційна вага кластерів w , та точність кластеризації ε . За допомогою генератора випадкових чисел (ГВЧ) генерується матриця нечіткого розбиття F :

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & \dots & f_{1c} \\ \dots & f_{ki} & \dots \\ f_{n1} & \dots & f_{nc} \end{bmatrix}, \quad (26)$$

яка задовольняє наступним умовам:



$$\sum_{i=1}^c f_{ki} = 1, \quad k = 1, \dots, n, \quad (27)$$

$$f_{ki} > 0, \quad \forall k = 1, \dots, n; \quad i = 1, \dots, c. \quad (28)$$

Розраховуються центри кластерів:

$$V_{ki} = \frac{\sum_{k=1}^n (f_{ki})^m X_k}{\sum_{k=1}^n (f_{ki})^m}, \quad i = 1, \dots, c. \quad (29)$$

Розраховується відстань між об'єктами кластеризації X та центрами кластерів:

$$D_{ki} = (X_k - V_i)^2, \quad k = 1, \dots, n, \quad i = 1, \dots, c. \quad (30)$$

Перераховуються елементи матриці (26):

$$f_{ki} = \frac{1}{\left(D_{ik}^2 \sum_{j=1}^c \frac{1}{D_{jk}} \right)^{\frac{1}{m-1}}}; \quad j = 1, \dots, c. \quad (31)$$

Перевіряється умова точності кластеризації:

$$\|F - F^*\| < \varepsilon. \quad (32)$$

де F^* – матриця нечіткого розбиття попередньої ітерації алгоритму. Якщо умова виконується – кластеризація закінчується; якщо ні – повернення до (29).

За отриманою матрицею нечіткого розбиття F визначається приналежність об'єкта до одного з кластерів C за наступною умовою:

$$n_k \in c_i \langle \max \{f_{ki}\} \rangle, \quad i = 1, \dots, c, \quad k = 1, \dots, n. \quad (33)$$

З урахуванням визначеного розподілу елементів мережі власних потреб ГЕС по кластерам приймається рішення щодо першочерговості заміни або модернізації елементів, що потрапили до найслабших кластерів.

Приклад. У вузлі мережі власних потреб ГЕС (Рис. 2) необхідно визначити найбільш слабкі елементи, які доцільно замінити для збільшення надійності мережі власних потреб ГЕС.

Для визначення інтервальних коефіцієнтів статичних характеристик навантаження фідерів $\Phi 1$,

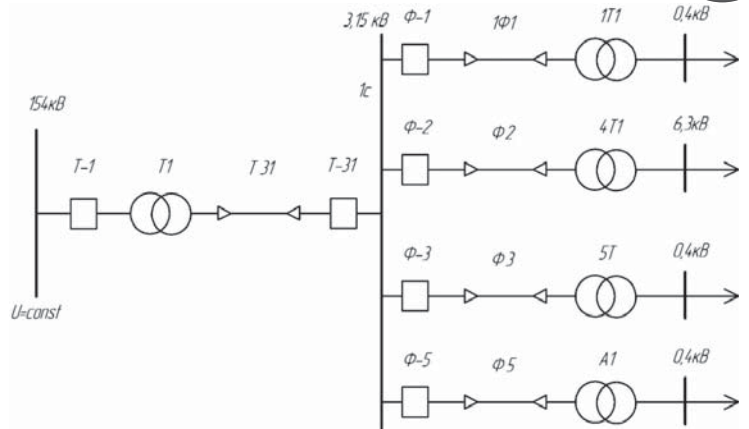


Рис. 2. Схема вузла мережі власних потреб ГЕС

Ф2, Ф3 та Ф5, а також вузла T1 в цілому використано режимні дані, приведені в Табл. 5.

За методом, викладеним в [1] та (2)–(9) визначено інтервальні коефіцієнти статичних характеристик навантаження фідерів та вузла мережі власних потреб ГЕС. Результати представлені в Табл. 6.

Режимні параметри вузла мережі власних потреб в момент часу t_1 представлені в Табл. 7.

Згідно з виразом (11) сформовано задачу визначення дискретних значень коефіцієнтів статичних характеристик навантаження фідерів та вузла. Результати представлені в Табл. 8.

За критерієм (1) визначається вираз для оцінювання РЕН фідерів та вузла мережі власних потреб ГЕС:

Таблиця 5. Характеристики режиму вузла навантаження

№ п/п	Ф1			Ф2			Ф3			Ф5		
	U, кВ	P, кВт	Q, кВАр	U, кВ	P, кВт	Q, кВАр	U, кВ	P, кВт	Q, кВАр	U, кВ	P, кВт	Q, кВАр
1	3,2	75	25	3,2	805	290	3,2	60	15	3,2	125	40
2	3,23	65	25	3,23	845	310	3,23	70	20	3,23	120	40
3	3,18	100	40	3,18	900	380	3,18	45	10	3,18	110	35
4	3,27	80	30	3,27	600	150	3,27	50	20	3,27	110	30
5	3,21	55	20	3,21	770	300	3,21	60	25	3,21	100	35
6	3,13	40	15	3,13	505	120	3,13	50	30	3,13	85	25
7	3,16	45	20	3,16	550	140	3,16	45	20	3,16	90	35
8	3,08	60	40	3,08	690	250	3,08	65	30	3,08	120	50
9	3,1	70	35	3,1	715	275	3,1	40	10	3,1	105	35
10	3,02	90	35	3,02	925	400	3,02	50	15	3,02	80	25

Таблиця 6. Інтервальні коефіцієнти статичних характеристик навантаження

Фідер	D_0	D_1	D_2	F_0	F_1	F_2
Ф1	[-0,017;0,037]	[0,017;0,033]	[-0,028; 0,032]	[0,032; 0,16]	[-0,152;-0,1]	[0,026;0,172]
Ф2	[0,096; 0,112]	[-0,02; 0,17]	[-0,013; 0,043]	[0,912; 1,184]	[-1,484; -0,82]	[0,32; 1,216]
Ф3	[0,004;0,01]	[0,001;0,007]	[0,001;0,007]	[0,056;0,1]	[-0,107; -0,067]	[0,025;0,093]
Ф5	[-0,023;0,043]	[0,014;0,016]	[-0,012;0,026]	[0,104;0,134]	[-0,329;-0,053]	[0,068;0,198]
T1	[0,055;0,134]	[0,104;0,233]	[-0,1;0,032]	[0,56;0,874]	[-1,287; -0,672]	[0,242;0,997]

Таблиця 7. Режимні параметри в момент часу t_1

Ф1			Ф2			Ф3			Ф5			T1		
U, кВ	P, кВт	Q, кВАр	U, кВ	P, кВт	Q, кВАр	U, кВ	P, кВт	Q, кВАр	U, кВ	P, кВт	Q, кВАр	U, кВ	P, кВт	Q, кВАр
0,411	45	20	6,381	570	150	0,412	40	10	0,407	95	30	3,254	750	210



Таблиця 8. Дискретні значення коефіцієнтів статичних характеристик в момент часу t_1

Фідер	$U, \text{в.о.}$	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2
Ф1	1,027	0,5	3,125	-2,625	32,5	-67,5	36
Ф2	1,013	0,982	0,133	-0,115	26,081	-34,108	9,027
Ф3	1,029	0,667	0,167	0,167	32,5	-46	14,5
Ф5	1,018	-0,588	0,882	0,706	23,8	-48,2	25,4
T1	1,033	0,390	1,077	-0,467	28,720	-48,952	21,232

Таблиця 9. Результати оцінки РЕН фідерів за критерієм dQ/dU

№ фідеру	Значення dQ/dU
T1	-0,376
Ф1	0,0129
Ф2	-0,585
Ф3	-0,032
Ф5	0,0176

Таблиця 10. Нечітке моделювання технічного стану кабелів мережі власних потреб ГЕС

Кабель	Опір ізоляції, МОм	Випробувальна напруга, кВ	Струми витоку, мкА	Коеф. завантаження, в.о.	Температура, $^{\circ}\text{C}$	$S, \text{в.о.}$
T31	71	7,5	90	0,28	41	0,7295
1Ф1	1,5	7	300	0,11	48	0,4223
Ф2	290	10	32	0,14	32	0,8831
Ф3	1400	10	17	0,17	29	0,8541
Ф5	19	5	340	0,11	34	0,2933

$$dQ(U)/dU = Q_0 b_1 + 2Q_0 b_2 U. \quad (34)$$

За виразом (34) з використанням даних з Табл. 8 визначається РЕН фідерів та вузла мережі власних потреб ГЕС. Результати приведені в Табл. 9.

Оцінку технічного стану кабелів, що є у розглядуваній мережі власних потреб ГЕС, виконано за розробленою вище нечіткою моделлю за даними отриманими в режимі "on-line" та під час періодичної перевірки. Вхідні ознаки стану та результат моделювання приведено в Табл. 10.

Оцінка технічного стану інших елементів мережі власних потреб (трансформатори, вимикачі) виконана за моделями, представленими в [4, 8]. За статистичними інтегральними функціями роз-

поділу імовірностей відмови кабелів [11], трансформаторів [12] та вимикачів [12] за (12) визначаються безумовні імовірності відмови та безвідмовної роботи об'єкта, а за нечітким виводом Заде [1] – умовні імовірності підтвердження відмови/безвідмовної роботи об'єкта наявністю у нього стану S . За (13) визначається умовна імовірність відмови об'єкта на інтервалі часу $\Delta t = 3$ міс., за умови що в момент часу t_1 об'єкт перебував у працездатному стані. Результати зведені в Табл. 11.

Оскільки при заміні або модернізації мережі власних потреб доцільно виконувати заміну обладнання всього фідера одночасно (вимикач, кабель, трансформатор), то для визначення найбільш слабких приєднань треба визначити імовірність відмови приєднання як суму імовірностей відмови послідовно з'єднаних елементів, за умови що відмови цих елементів є сумісними подіями. Згідно з [9], імовірності відмови фідерів визначаються за формулою суми імовірностей сумісних подій:

Таблиця 11. Імовірності відмови електрообладнання мережі власних потреб ГЕС

Елемент	$F(t_1)$	$F(t_2)$	$p(H_1)$	$P(H_2)$	$p(B/H_1)$	$p(B/H_2)$	$p(H_1/B)$
Кабелі							
T31	0,512	0,575	0,129	0,871	0,245	0,693	0,05
1Ф1	0,512	0,575	0,129	0,871	0,414	0,428	0,125
Ф2	0,512	0,575	0,129	0,871	0,107	0,855	0,019
Ф3	0,512	0,575	0,129	0,871	0,074	0,816	0,013
Ф5	0,512	0,575	0,129	0,871	0,658	0,244	0,285
Трансформатори							
T1	0,745	0,765	0,078	0,922	0,444	0,415	0,083
1T1	0,65	0,64	0,028	0,972	0,438	0,420	0,029
4T1	0,410	0,415	0,008	0,992	0,444	0,415	0,009
5T3	0,595	0,6	0,012	0,988	0,445	0,413	0,013
A1	0,65	0,64	0,028	0,972	0,255	0,656	0,011
Вимикачі							
T-1	0,745	0,765	0,036	0,964	0,415	0,425	0,035
T-31	0,975	0,985	0,4	0,6	0,248	0,658	0,2
Ф-1	0,945	0,965	0,36	0,64	0,244	0,658	0,173
Ф-2	0,870	0,880	0,077	0,923	0,248	0,671	0,03
Ф-3	0,9	0,913	0,13	0,87	0,245	0,658	0,053
Ф-5	0,945	0,965	0,36	0,64	0,249	0,669	0,204

Таблиця 12. Імовірності відмови приєднань на інтервалі часу Δt

Приєднання	Імовірність відмови на інтервалі часу			Імовірність відмови приєднання $p(\Delta t)$
	Вимикач	Трансформатор	Кабель	
T1	0,035	0,083	0,05	0,327
	0,2			
Ф1	0,173	0,029	0,125	0,297
Ф2	0,03	0,009	0,019	0,057
Ф3	0,053	0,013	0,013	0,077
Ф5	0,204	0,011	0,285	0,437

$$p(\Delta t) = \sum_{i=1}^n p_i(H_1/B) - \sum_{i=1, j=1, i \neq j}^n p_i(H_1/B)p_j(H_1/B) + \sum_{i=1, j=1, k=1, i \neq j \neq k}^n p_i(H_1/B)p_j(H_1/B)p_k(H_1/B). \quad (35)$$

Згідно з виразом (35) визначаються імовірності відмови приєднань на інтервалі часу з урахуванням технічного стану елементів, що формують приєднання. Результати приведені в Табл. 12.

Приведені в Табл. 9 результати оцінки РЕН фідерів за критерієм dQ/dU та імовірності відмови приєднань з Табл. 12 формують вектори режимного стану обладнання P_1 та технічного стану обладнання P_2 . З них, відповідно до (25), формується матриця об'єктів кластеризації X :

$$X = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{21} \\ P_{12} & P_{22} \\ P_{13} & P_{23} \\ P_{14} & P_{24} \\ P_{15} & P_{25} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,376 & 0,327 \\ 0,0129 & 0,297 \\ -0,585 & 0,057 \\ -0,032 & 0,077 \\ 0,0176 & 0,437 \end{bmatrix}. \quad (36)$$



Визначаються нечіткі кластери. Виходячи з задачі визначення слабких елементів мережі власних потреб, доцільно прийняти кількість кластерів $m = 3$. Назви кластерів наступні: $c_1 =$ "Слабкий"; $c_2 =$ "Середній"; $c_3 =$ "Сильний". Згідно з рекомендаціями [5], експоненційна вага приймається рівною $w = 2$, а точність кластеризації $\varepsilon = 10^{-3}$. За допомогою ГВЧ генерується початкова матриця нечіткого розбиття :

$$F^{(0)} = \begin{bmatrix} 0,35 & 0,4 & 0,25 \\ 0,5 & 0,2 & 0,3 \\ 0,15 & 0,75 & 0,1 \\ 0,45 & 0,2 & 0,35 \\ 0,55 & 0,25 & 0,2 \end{bmatrix}. \quad (37)$$

За (29) розраховуються центри кластерів. На першому кроці вони складають:

$$V_{c1} = 0,1146; V_{c2} = -0,1516; V_{c3} = 0,67. \quad (38)$$

За (30) розраховуються відстані між об'єктами кластеризації X та центрами кластерів. На першому кроці вони дорівнюють:

$$D = \begin{bmatrix} 0,535 & 0,529 & 0,513 \\ 0,209 & 0,478 & 0,237 \\ 0,702 & 0,481 & 0,652 \\ 0,151 & 0,258 & 0,099 \\ 0,337 & 0,612 & 0,374 \end{bmatrix}. \quad (39)$$

Перераховуються елементи матриці нечіткого розбиття F . На першому кроці результат перерахунку має вигляд:

$$F^{(1)} = \begin{bmatrix} 0,322 & 0,329 & 0,349 \\ 0,508 & 0,097 & 0,395 \\ 0,233 & 0,496 & 0,271 \\ 0,272 & 0,094 & 0,634 \\ 0,473 & 0,143 & 0,384 \end{bmatrix}. \quad (40)$$

Перевіряється умова точності кластеризації за виразом (32):

$$\|F - F^*\| = 0,311 > \varepsilon. \quad (41)$$

Умова не виконується, тому продовжується пошук центрів кластерів та визначення матриці нечіткого розбиття, яка забезпечить виконання умови точності кластеризації. Після 5 кроків визначено наступну матрицю нечіткого розбиття:

$$F^{(5)} = \begin{bmatrix} 0,317 & 0,325 & 0,358 \\ 0,551 & 0,103 & 0,346 \\ 0,225 & 0,485 & 0,29 \\ 0,194 & 0,068 & 0,738 \\ 0,502 & 0,149 & 0,349 \end{bmatrix}. \quad (42)$$

при цьому умова точності виконується: $0,0089 < \varepsilon$.

Оскільки перший стовпчик матриці $F^{(7)}$ виз-

начає ступінь приналежності приєднання до кластеру $c_1 =$ "Слабкий", другий — до кластеру $c_2 =$ "Середній", третій — до кластеру $c_3 =$ "Сильний", то розподіл приєднань мережі власних потреб по кластерах, згідно з (33), виглядає наступним чином:

$$c_1 = \{T1; \Phi1\}; c_2 = \{\Phi5\}; c_3 = \{\Phi2; \Phi3\}. \quad (43)$$

Отримані результати свідчать, що слабкий кластер C_1 формують приєднання $\Phi1$ та $\Phi5$. Таким чином для підвищення надійності вузла мережі власних потреб ГЕС необхідно першочергово виконати заміну наступного обладнання:

- 1) вимикачів $\Phi-1, \Phi-5$;
- 2) кабелів $1\Phi1, \Phi5$;
- 3) трансформаторів $1T1, A1$.

Висновки. Розроблений метод інтервальної ідентифікації коефіцієнтів статичних характеристик навантаження вузла мережі власних потреб ГЕС дозволяє більш точно проводити розрахунки ustalених електричних режимів мережі власних потреб в умовах стохастичності зміни навантаження в процесі роботи ГЕС.

Проведене дослідження регульовального ефекту навантаження споживачів вузла навантаження мережі власних потреб ГЕС за критерієм dQ/dU з використанням статичних характеристик навантаження, побудованих з урахуванням поточного складу навантаження з визначенням коефіцієнтів на інтервалах приналежності, дозволяє виконати оцінку режимної надійності мережі власних потреб.

Розроблена нечітка модель силового кабелю дозволяє визначити його фактичний стан з використанням інформації, отриманої під час періодичних випробувань та інформації, отриманої "on-line". Визначені імовірності відмови на інтервалі часу обладнання мережі власних потреб ГЕС з використанням статистичних даних щодо відмов обладнання даного типу та даних про стан окремих одиниць обладнання дають можливість подальшого визначення слабких елементів мережі власних потреб ГЕС.

Для виявлення груп слабких елементів мережі ВП ГЕС з урахуванням режимного та технічного стану використано метод нечіткої кластеризації s -середніх, як найбільш підходящий до задач нечіткої класифікації з невизначеними початковими умовами, за допомогою якого визначено елементи мережі власних потреб, що вимагають першочергової заміни в умовах обмеженості фінансування та багатокритеріального вибору.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Літвінов В.В.* Моделювання статичного навантаження при визначенні слабких елементів мережі власних потреб ГЕС / В.В. Літвінов, І.Г. Котелевська // Гідроенергетика України. — 2016. — № 3-4. — С. 17–21.



2. *Конюхова Е.А.* Выбор мощности батарей конденсаторов в цеховых сетях промышленных предприятий с учетом режимов напряжения / Е.А. Конюхова // *Электричество*. — 1998. — № 1. — С. 18–25.
3. *Костерев М.В.* Застосування інтервального методу для ідентифікації параметрів еквівалентного двигунового навантаження / М.В. Костерев, В.В. Літвінов // *Восточно-Европейский журнал передовых технологии ISSN 1729-3774*. Процессы управления. — 2015. — № 1/3 (73). — С. 15–20.
4. *Літвінов В.В.* Оцінка ризику порушення стійкості двигунового навантаження при відмовах електрообладнання в підсистемі ЕЕС / Володимир Валерійович Літвінов // Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: (05.14.02 — електричні станції, мережі та системи). — К., 2012. — 20 с.
5. *Штовба С.Д.* Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. — М.: Горячая линия — Телеком, 2007. — 288 с.
6. *Костерев М.В.* Розроблення імовірно-статистичного підходу до визначення слабких підсистем електроенергетичної системи / М.В. Костерев, В.В. Літвінов // *ScienceRise*. — 2016. — №12/2(29). — С. 46–52.
7. *Маркович И.М.* Режимы энергетических систем / И.М. Маркович. М.: Госэнергоиздат, 1980. — 362 с.
8. *Костерев М.В.* Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем / М.В. Костерев, Є.І. Бардик. — К.: НТУУ "КПІ", 2010. — 131 с.
9. *Вентцель Е.С.* Исследование операций / Е.С. Вентцель. — М.: Сов. радио, 1972. — 552 с.
10. *Ременников В.Б.* Управленческие решения / В.Б. Ременников. Минск: Юнити, 2005. — 144 с.
11. *Анализ* состояния безопасности движения поездов, надежности работы систем и ЖАТ в хозяйстве автоматики и телемеханики в 2012 году. — М.: — 2013. — 156 с.
12. *Літвінов В.В.* Дослідження впливу відмов протиаварійної автоматики на ризик виникнення аварії в енергосистемі / В.В. Літвінов // *Восточно-Европейский журнал передовых технологии ISSN 1729-3774*. Энергосберегающие технологии и оборудование. 2014. — № 6/8 (72). — С. 47–56

© Літвінов В.В., Котелевська І.Г., 2017

