



УДК 621.311

ЛІТВИНОВ В.В., канд. техн. наук, нач. ВТС Дніпровської ГЕС
ПрАТ "Укргідроенерго",

КІЛЬОВА К.А., інж. відділу перспективного розвитку РДЦ
Дніпровського регіону ДП "НЕК "Укренерго"

ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МЕХАНІЧНИХ ВУЗЛІВ ГІДРОГЕНЕРАТОРА

В роботі визначено підхід до оцінювання технічного стану механічних вузлів гідрогенератора. Розроблено нечіткі моделі типу Мамдані для визначення технічного стану підп'ятника та підшипників гідрогенератора, які дозволяють ефективно використовувати наявні характеристики стану та експертну інформацію для кількісної оцінки надійності вузлів гідрогенератора в задачах визначення ресурсу та імовірності відмови обладнання на інтервалі часу.

Ключові слова: гідрогенератор, підп'ятник, підшипник, технічний стан, нечітка модель.

Вступ. Важливою умовою надійного функціонування електроенергетичної системи (ЕЕС) України є надійна та безвідмовна робота генеруючого обладнання електричних станцій, зокрема генераторів гідроелектростанцій, які в теперішній час несуть як базове навантаження так і забезпечують регулювання перетоків активної потужності в ЕЕС України. Для дослідження надійності гідрогенераторів необхідно мати достовірні моделі оцінювання їхнього технічного стану, які б враховували [1]:

- структурну складність гідрогенератора як підсистеми ЕЕС;
- значну кількість різномірних діагностичних ознак;
- відсутність математичного зв'язку між діагностичними ознаками стану гідрогенератора та його окремих вузлів;
- використання тільки тих діагностичних параметрів, отримання яких можливе в режимі "on-line" без виведення генератора в ремонт.

З точки зору аналізу надійності гідрогенератор представляє собою складний об'єкт, який доцільно розглядати як сукупність окремих вузлів та підсистем [1]. В роботах [2, 3] запропоновано моделі оцінювання стану електричних вузлів генератора (обмотка статора). Але, згідно зі статистичними даними [2], найбільш пошкоджуваними вузлами є

механічні вузли, а саме підшипники та підп'ятник. Таким чином, для комплексного визначення стану та достовірної оцінки надійності гідрогенератора необхідно розроблення моделей оцінювання стану його підшипників та підп'ятника.

Постановка задачі. Модель оцінювання технічного стану механічних вузлів гідрогенератора має враховувати різномірні діагностичні ознаки підшипників та підп'ятника між якими немає чітко виражених аналітичних зв'язків та використовувати тільки величини та характеристики, які можна виміряти та визначити встановленою системою моніторингу параметрів генератора. Таку модель зі значною кількістю невизначеностей найкраще побудувати з використанням нечітких методів та алгоритмів [4, 5].

Нечіткі моделі для оцінювання технічного стану механічних вузлів гідрогенератора. В роботах [1–3] при оцінюванні ТС локальних вузлів гідрогенератора використано нечіткий алгоритм Мамдані [5], який дає задовільні результати за невеликої кількості діагностичних ознак та використовує базу правил, складену з якісних правил "ЯКЩО-ТО", які є зручними для формування експертом в умовах відсутності аналітичних зв'язків між діагностичними ознаками. Даний алгоритм можна використати і для механічних вузлів гідрогенератора, оскільки кількість діагностичних ознак невелика.

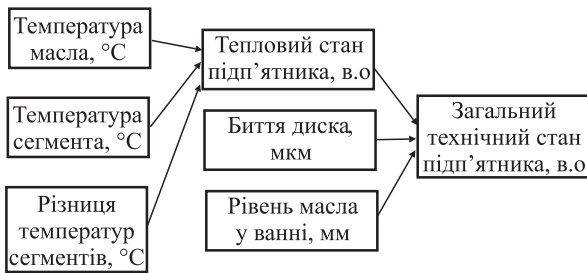


Рис. 1. Структурна схема нечіткої моделі під'ятника гідрогенератора

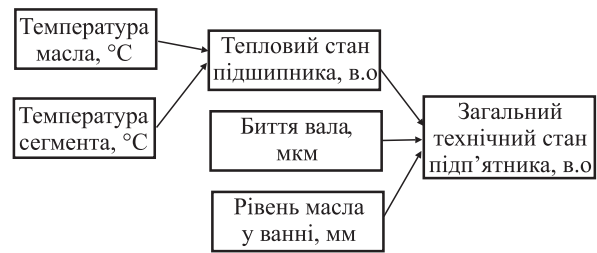


Рис. 2. Структурна схема нечіткої моделі підшипника гідрогенератора

Найбільш важливими групами параметрів, які характеризують стан обертових вузлів (під'ятник, підшипники) великої електричної машини, є:

- параметри вібраційного стану;
- параметри теплового стану;
- параметри системи охолодження.

Для під'ятників будь-якого типу (підвісних машин, зонтичних машин, на жорсткому, пружинному або гідравлічному обпиранні) основними параметрами стану є:

- биття диска під'ятника, мкм; - температура масла під'ятника, °C;
- температура найбільш нагрітого сегмента під'ятника, °C;
- максимальна різниця температур між двома сегментами під'ятника, °C; - рівень масла у ванні під'ятника, мм;
- температура охолоджувальної води, °C;
- витрати води на охолодження, м³/год.

Згідно [4], для можливості експрес-оцінювання стану вузлів гідрогенератора необхідно використовувати тільки такі параметри, які можна виміряти або визначити в режимі "он-лайн". Оскільки на гідрогенераторах температура та витрати води, зазвичай, контролюються лише на вході всієї системи технічного водопостачання гідрогенератора, а не на вході у маслоохолоджувачі під'ятника, то ці параметри доцільно не використовувати в моделі оцінки стану. Повнота та достовірність моделі оцінювання стану під'ятника при цьому не знижуються, оскільки в разі погіршення характеристик системи охолодження (підвищення температури води, зниження витрат води через засмічення охолоджувачів молюском-дрейсоною) це одразу позначиться на температурі масла та сегментів під'ятника. Таким чином, в якості вхідних величин нечіткої моделі оцінки стану під'ятника гідрогенератора прийнято: B = "Биття диска під'ятника"; T_M = "Температура масла під'ятника"; T_C = "Температура найбільш нагрітого сегмента під'ятника"; ΔT_C = "Максимальна різниця температур між двома сегментами під'ятника"; L = "Рівень масла у ванні під'ятника".

Кількість вхідних величин невелика. Згідно з рекомендаціями [5] можна було б застосувати од-

норівневу нечітку модель, але враховуючи те, що три з п'яти діагностичних ознак характеризують тепловий стан об'єкта, доцільно звести їх у окрему нечітку модель Мамдані першого рівня, вихідною величиною якої буде S_T = "Тепловий стан під'ятника". Ця величина разом з вібраційною характеристикою B та характеристикою охолоджувального середовища L формує другий рівень нечіткої моделі, вихідною величиною якого буде величина S = "Загальний технічний стан під'ятника".

Такий підхід до структури нечіткої моделі також спростить експерту формування лінгвістичних правил типу "ЯКЩО-ТО", оскільки кількість умов в одному правилі значно менше у порівнянні з правилами однорівневої моделі. Розмірність бази правил також суттєво зменшується. Структурна схема розробленої нечіткої моделі приведена на Рис. 1.

Для направляючих підшипників гідрогенераторів основними параметрами стану є: биття вала в районі підшипника, мкм; температура масла підшипника, °C; температура найбільш нагрітого сегмента

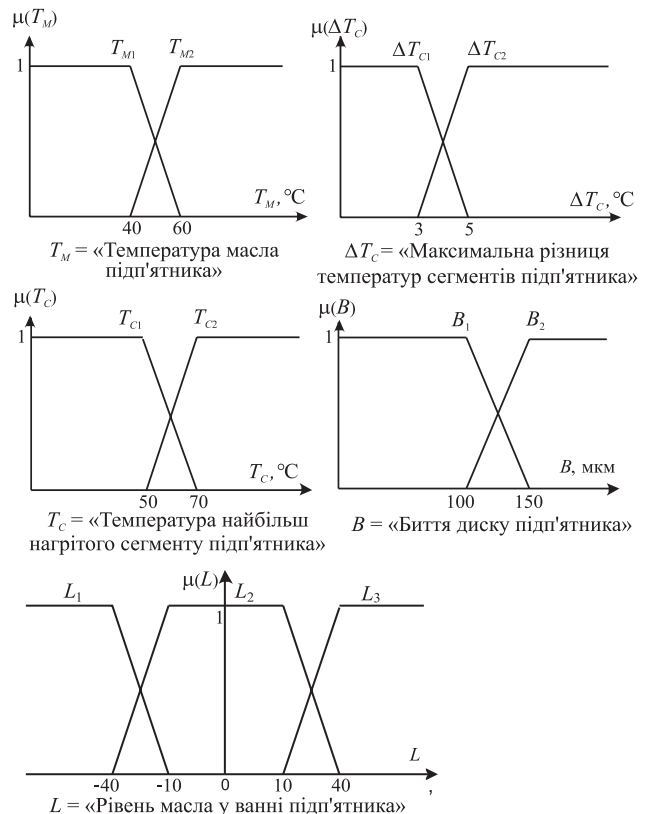


Рис. 3. Функції приналежності вхідних величин нечіткої моделі оцінювання технічного стану під'ятника гідрогенератора

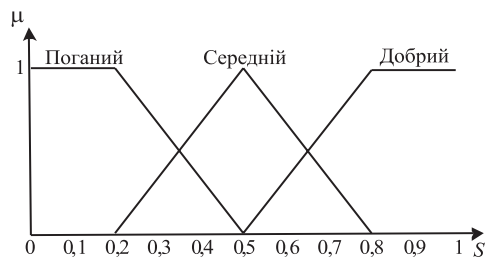


Рис. 4. Функції приналежності вихідної величини "Тепловий стан під'ятника"

підшипника, °C; рівень масла у ванні підшипника, мм.

Всі перераховані параметри на потужних гідро-генераторах підлягають моніторингу в режимі "он-лайн". Тому, в якості вхідних величин нечіткої моделі оцінки стану підшипника гідрогенератора прийнято: B = "Биття вала в районі підшипника"; T_M = "Температура масла підшипника"; T_C = "Температура найбільш нагрітого сегмента підшипника"; L = "Рівень масла у ванні підшипника".

З урахуванням майже ідентичного складу вхідних величин, у порівнянні з нечіткою моделлю підшипника, визначимо структурну схему нечіткої моделі підшипника за аналогічним підходом. Структурна схема розробленої нечіткої моделі приведена на Рис. 2.

За підходом описаним в [3, 4] виконується налаштування обох нечітких моделей.

Нечітка модель для оцінювання стану під'ятника. Для кожної вхідної лінгвістичної змінної введені наступні нечіткі терми: B : B_1 = "Допустиме", B_2 = "Недопустиме"; T_M : T_{M1} = "Нормальна", T_{M2} = "Висока"; T_C : T_{C1} = "Нормальна", T_{C2} = "Висока"; ΔT_C : ΔT_{C1} = "Допустиме", ΔT_{C2} = "Недопустиме"; L : L_1 = "Низький", L_2 = "Нормальний", L_3 = "Високий".

Функції приналежності нечітких термів вхідних величин будуються за експертними оцінками [2] з використанням правила Руспіні для забезпечення непротиворічності та прозорості нечіткої моделі [5]. Проведено опитування п'яти експертів з Дніпровської ГЕС-1, за результатами якого побудовано функції приналежності вхідних величин нечіткої моделі оцінювання стану під'ятників гідроагрегатів Дніпровської ГЕС-1. Ці функції приналежності представлені на Рис. 3 та описуються аналітичними виразами (1):

$$\mu_{T_{M1}}(T_M) = \begin{cases} 1; & T_M \leq 40; \\ 1 - (T_M - 40) / 20; & 40 \leq T_M \leq 60; \\ 0; & T_M \geq 60. \end{cases}$$

$$\mu_{T_{M2}}(T_M) = \begin{cases} 0; & T_M \leq 40; \\ 1 - (60 - T_M) / 20; & 40 \leq T_M \leq 60; \\ 1; & T_M \geq 60. \end{cases}$$

$$\mu_{T_{C1}}(T_C) = \begin{cases} 1; & T_C \leq 50; \\ 1 - (T_C - 50) / 20; & 50 \leq T_C \leq 70; \\ 0; & T_C \geq 70. \end{cases}$$

$$\mu_{T_{C2}}(T_C) = \begin{cases} 0; & T_C \leq 50; \\ 1 - (70 - T_C) / 20; & 50 \leq T_C \leq 70; \\ 1; & T_C \geq 70. \end{cases}$$

$$\mu_{\Delta T_{C1}}(\Delta T_C) = \begin{cases} 1; & \Delta T_C \leq 3; \\ 1 - (\Delta T_C - 3) / 2; & 3 \leq \Delta T_C \leq 5; \\ 0; & \Delta T_C \geq 5. \end{cases}$$

$$\mu_{\Delta T_{C2}}(\Delta T_C) = \begin{cases} 0; & \Delta T_C \leq 3; \\ 1 - (5 - T_C) / 2; & 3 \leq \Delta T_C \leq 5; \\ 1; & \Delta T_C \geq 5. \end{cases}$$

$$\mu_{B_1}(B) = \begin{cases} 1; & B \leq 100; \\ 1 - (B - 100) / 50; & 100 \leq B \leq 150; \\ 0; & B \geq 150. \end{cases}$$

$$\mu_{B_2}(B) = \begin{cases} 0; & B \leq 100; \\ 1 - (150 - B) / 50; & 100 \leq B \leq 150; \\ 1; & B \geq 150. \end{cases}$$

$$\mu_{L_1}(L) = \begin{cases} 1; & L \leq -40; \\ 1 - (L + 40) / 30; & -40 \leq L \leq -10; \\ 0; & L \geq -10. \end{cases}$$

$$\mu_{L_2}(L) = \begin{cases} 0; & L \leq -40; \\ 1 - (-10 - L) / 30; & -40 \leq L \leq -10; \\ 1; & -10 \leq L \leq 10; \end{cases}$$

$$\mu_{L_3}(L) = \begin{cases} 1 - (L - 10) / 30; & 10 \leq L \leq 40; \\ 0; & L \geq 40. \end{cases}$$

$$\mu_{L_3}(L) = \begin{cases} 0; & L \leq 10; \\ 1 - (40 - L) / 30; & 10 \leq L \leq 40; \\ 1; & L \geq 40. \end{cases} \quad (1)$$

Вихідна величина S_T = "Тепловий стан під'ятника" описується трьома нечіткими термами: Д – "Добрий", С – "Середній", П – "Поганий" [4]. Їхні функції приналежності визначені на стандартних інтервалах шкали Харрінгтона [6] та представлені на Рис. 4 та описуються аналітичними виразами (2).

$$\mu_P(S) = \begin{cases} 1; & S \leq 0,2; \\ 1 - (S - 0,2) / 0,3; & 0,2 \leq S \leq 0,5; \\ 0; & S \geq 0,5. \end{cases}$$

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

$$\mu_D(S) = \begin{cases} 0; & S \leq 0,5; \\ 1 - (0,8 - S) / 0,3; & 0,5 \leq S \leq 0,8; \\ 1; & S \geq 0,8. \end{cases} \quad (2)$$

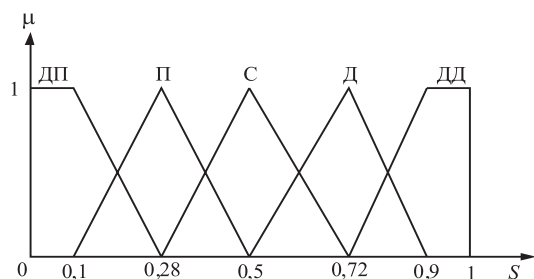


Рис. 5. Функції приналежності вихідної величини "Загальний технічний стан під'ятника"



Вихідну множину станів під'ятника S описано лінгвістичною змінною "Загальний технічний стан під'ятника", яка складається з п'яти нечітких термів, також визначених на інтервалах шкали Харрінгтона: ДД – "Дуже добрий стан" (0,8; 1,0]; Д – "Добрий стан" (0,64; 0,8]; С – "Середній стан" (0,36; 0,64]; П – "Поганий стан" (0,2; 0,36]; ДП – "Дуже поганий стан" [0,0; 0,2].

Побудовані функції приналежності вихідної змінної представлені на Рис. 5 та описуються аналітичними виразами (3).

$$\begin{aligned} \mu_{\text{ДД}}(S) &= \begin{cases} 1; & S > 0,9; \\ 1 - (0,9 - S) / 0,18; & 0,72 \leq S \leq 0,9; \\ 0; & S < 0,72. \end{cases} \\ \mu_{\text{Д}}(S) &= \begin{cases} 1 - (0,72 - S) / 0,22; & 0,72 \geq S \geq 0,5; \\ 1 - (S - 0,72) / 0,18; & 0,72 < S \leq 0,9; \\ 0; & 0,5 > S > 0,9. \end{cases} \\ \mu_{\text{С}}(S) &= \begin{cases} 1 - (0,5 - S) / 0,22; & 0,5 \geq S \geq 0,28; \\ 1 - (S - 0,5) / 0,22; & 0,5 < S \leq 0,72; \\ 0; & 0,28 > S > 0,72. \end{cases} \\ \mu_{\text{П}}(S) &= \begin{cases} 1 - (0,28 - S) / 0,18; & 0,28 \geq S \geq 0,1; \\ 1 - (S - 0,28) / 0,22; & 0,28 < S \leq 0,5; \\ 0; & 0,1 > S > 0,5. \end{cases} \\ \mu_{\text{ДП}}(S) &= \begin{cases} 1; & S < 0,1; \\ 1 - (S - 0,1) / 0,18; & 0,1 \leq S \leq 0,28; \\ 0; & S > 0,28. \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

База правил нечіткої моделі для оцінювання технічного стану під'ятника гідрогенератора будується експертом, який формує якісні нечіткі правила. Виходом нечіткої моделі є кількісна оцінка стану під'ятника. Правила формуються у вигляді висловлювань "ЯКЩО-ТО" і мають наступну структуру:

1. "Якщо температура масла під'ятника $T_M = \{T_{M1}, T_{M2}\}$, і температура сегмента під'ятника $T_C = \{T_{C1}, T_{C2}\}$, і різниця температур сегментів під'ятника $\Delta T_C = \{\Delta T_{C1}, \Delta T_{C2}\}$, то тепловий стан під'ятника $S_T = \{Д, С, П\}$ ".

2. "Якщо биття диску під'ятника $B = \{B_1, B_2\}$, і тепловий стан під'ятника $S_T = \{Д, С, П\}$, і рівень масла у ванні під'ятника $L = \{L_1, L_2, L_3\}$, то загальний технічний стан під'ятника $S_T = \{ДД, Д, С, П, ДП\}$ ".

Побудовані експертом бази правил першого та другого рівня нечіткої моделі приведені в Табл. 1, 2.

Дефазифікація виконується за центроїдним методом, представленим в [2, 5].

Нечітка модель для оцінювання стану підшипника. Для кожної вхідної лінгвістичної змінної введені наступні нечіткі терми: B : $B_1 =$ "Допустиме", $B_2 =$ "Недопустиме"; T_M : $T_{M1} =$ "Нормальна", $T_{M2} =$ "Висока"; T_C : $T_{C1} =$ "Нормальна", $T_{C2} =$ "Висока"; L : $L_1 =$ "Низький", $L_2 =$ "Нормальний", $L_3 =$ "Високий".

Таблиця 1. База правил для оцінки теплового стану під'ятника

$T_M = T_{M1}$			$T_M = T_{M2}$		
ΔT_C	T_{C1}	T_{C2}	ΔT_C	T_{C1}	T_{C2}
ΔT_{C1}	Д	С	ΔT_{C1}	С	П
ΔT_{C2}	С	П	ΔT_{C2}	П	П

Таблиця 2. База правил для оцінки загального технічного стану під'ятника

$B = B_1$				$B = B_2$			
S_T	П	С	Д	S_T	П	С	Д
L_1	П	С	С	L_1	ДП	П	С
L_2	С	Д	ДД	L_2	С	С	С
L_3	П	С	Д	L_3	ДП	П	С

Функції приналежності також будуються за оцінками п'яти експертів з Дніпровської ГЕС-1. Побудовані функції приналежності вхідних величин нечіткої моделі оцінювання стану підшипників гідрогенераторів Дніпровської ГЕС-1 представлені на Рис. 6 та описуються аналітичними виразами (4).

$$\begin{aligned} \mu_{T_{M1}}(T_M) &= \begin{cases} 1; & T_M \leq 50; \\ 1 - (T_M - 50) / 20; & 50 \leq T_M \leq 70; \\ 0; & T_M \geq 70. \end{cases} \\ \mu_{T_{M2}}(T_M) &= \begin{cases} 0; & T_M \leq 50; \\ 1 - (70 - T_M) / 20; & 50 \leq T_M \leq 70; \\ 1; & T_M \geq 70. \end{cases} \\ \mu_{T_{C1}}(T_C) &= \begin{cases} 1; & T_C \leq 60; \\ 1 - (T_C - 60) / 20; & 60 \leq T_C \leq 80; \\ 0; & T_C \geq 80. \end{cases} \\ \mu_{T_{C2}}(T_C) &= \begin{cases} 0; & T_C \leq 60; \\ 1 - (80 - T_C) / 20; & 60 \leq T_C \leq 80; \\ 1; & T_C \geq 80. \end{cases} \\ \mu_{B_1}(B) &= \begin{cases} 1; & B \leq 100; \\ 1 - (B - 100) / 80; & 100 \leq B \leq 180; \\ 0; & B \geq 180. \end{cases} \\ \mu_{B_2}(B) &= \begin{cases} 0; & B \leq 100; \\ 1 - (180 - B) / 80; & 100 \leq B \leq 180; \\ 1; & B \geq 180. \end{cases} \\ \mu_{L_1}(L) &= \begin{cases} 1; & L \leq -20; \\ 1 - (L + 20) / 10; & -20 \leq L \leq -10; \\ 0; & L \geq -10. \end{cases} \\ \mu_{L_2}(L) &= \begin{cases} 0; & L \leq -20; \\ 1 - (-10 - L) / 10; & -20 \geq L \geq -10; \\ 1; & -10 \leq L \leq 10; \\ 1 - (L - 10) / 10; & 10 \leq L \leq 20; \\ 0; & L \geq 20. \end{cases} \\ \mu_{L_3}(L) &= \begin{cases} 0; & L \leq 10; \\ 1 - (20 - L) / 10; & 10 \leq L \leq 20; \\ 1; & L \geq 20. \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

Вихідні величини $S_T =$ "Тепловий стан підшипника" та $S =$ "Загальний технічний стан

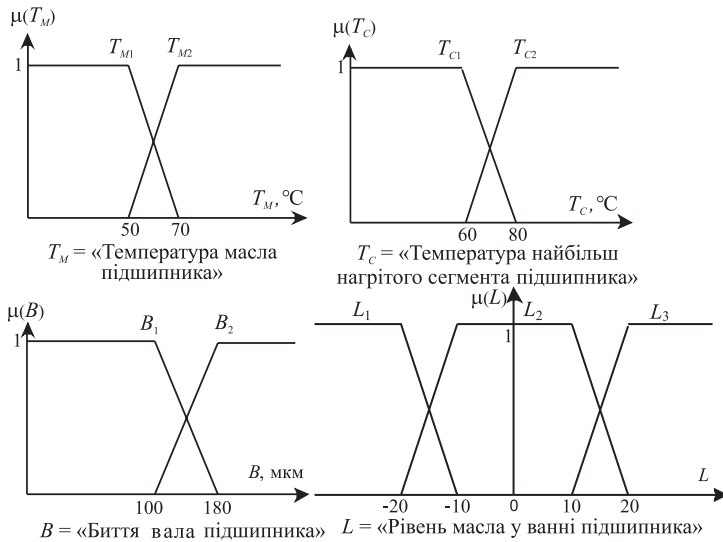


Рис. 6. Функції приналежності вхідних величин нечіткої моделі оцінювання технічного стану підшипників гідрогенератора

підшипників" нечіткої моделі оцінювання стану підшипників генератора аналогічні вихідним величинам нечіткої моделі оцінювання стану під'ятника.

База правил нечіткої моделі для оцінювання технічного стану підшипників гідрогенератора також будується експертом, який формує якісні нечіткі правила. Побудовані експертом бази правил приведені в Табл. 3, 4.

Дефазифікація виконується аналогічним чином, як і у моделі оцінювання нечіткого стану під'ятника.

Висновки. Запропонований в роботі нечіткий підхід до оцінювання технічного стану механічних вузлів гідроагрегатів дозволяє синтезувати нечіткі моделі оцінки стану під'ятника та підшипників гідрогенератора з урахуванням експертних знань та оцінок. Вихідні величини розроблених нечітких моделей є універсальними, вхідні легко адаптуються під будь-який гідрогенератор з урахуванням особливостей його функціонування та набору параметрів, які підлягають "он-лайн" моніторингу.

Отримані за розробленими нечіткими моделями кількісні оцінки стану підшипників та під'ятника гідроагрегату можуть бути використані як

Таблиця 3. База правил для оцінки теплового стану підшипника

	T_C	T_{C1}	T_{C2}
T_M			
T_{M1}		Д	С
T_{M2}		С	П

Таблиця 4. База правил для оцінки загального технічного стану підшипника

	$B = B_1$			$B = B_2$			
S_T	П	С	Д	S_T	П	С	Д
L				L			
L_1	П	С	С	L_1	ДП	П	С
L_2	С	Д	ДД	L_2	С	С	С
L_3	П	С	Д	L_3	ДП	П	С

для оцінки імовірності відмови механічних вузлів на інтервалі часу так і в якості вхідних величин в комплексну нечітку модель для оцінювання загального технічного стану гідрогенератора.

ЛІТЕРАТУРА

1. Літвінов В.В. Застосування нечіткого алгоритму Сугено при оцінюванні технічного стану гідрогенераторів / В.В. Літвінов, К.А. Манукян (Кільова) // Гідроенергетика України. – 2016. – № 3–4. – С. 22–24.
2. Litvinov V. Fuzzy-Statistical Modeling of Hydrogenerator for Its Reliability Appreciation / V. Litvinov, K. Manukian (Kilova) // The IJES. – Volume 3. – Issue 1. – 2014. – P. 85–95.
3. Літвінов В.В. Нечітко-статистичний підхід до оцінювання ризику пошкодження обмотки статора гідрогенератора / В.В. Літвінов // Гідроенергетика України. – 2014. – № 2–3. – С. 74–80.
4. Літвінов В.В. Оцінка ризику порушення стійкості двигунового навантаження при відмовах електрообладнання в підсистемі ЕЕС: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: (05.14.02 – електричні станції, мережі та системи) / Літвінов Володимир Валерійович, НТУУ "КПІ". – К., 2012. – 20 с.
5. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. - М.: Горячая линия - Телеком, 2007. - 288 с.
6. Ременников В.Б. Управленческие решения / В.Б. Ременников. Минск: Юнити, 2005. - 144 с.

