

УДК 621.311

В.В.ЛІТВИНОВ, М.В.КОСТЕРЄВ, Є.І.БАРДИК

## НЕЧІТКО-СТАТИСТИЧНИЙ МЕТОД ОЦІНКИ РИЗИКУ ПОРУШЕННЯ СТІЙКОСТІ ДВИГУНОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ В ПІДСИСТЕМІ ЕЕС

V. LITVINOV, N. KOSTEREV, YE. BARDYK

## FUZZY-STATISTICAL RISK ESTIMATION METHOD OF MOTOR LOAD STABILITY FAILURE IN POWER SUBSYSTEM

**Анотація.** Запропоновано використання нечітко-статистичного методу для оцінки ризику порушення стійкості двигунового навантаження в підсистемах ЕЕС як інтегрального показника її надійності. Цей метод дозволяє враховувати відмови обладнання, можливість розвитку аварійної ситуації та її наслідки. Розроблено алгоритм нечітко-статистичного моделювання підсистеми ЕЕС для оцінки ризику порушення стійкості відповідального двигунового навантаження при випадкових відмовах обладнання. Проведено імовірно-статистичне моделювання реальної підсистеми ЕЕС – схеми електропостачання потужного хімічного заводу. За його результатами визначено ризик зниження надійності підсистеми ЕЕС при порушенні стійкості відповідального двигуна.

**Ключові слова:** ризик, стійкість, надійність, відмова обладнання, нечітко-статистичний метод, стійкість двигунового навантаження.

**Аннотация.** Предложено использование нечетко-статистического метода для оценки риска нарушения устойчивости двигательной нагрузки в подсистемах ЭЭС в качестве интегрального показателя её надежности. Этот метод позволяет учитывать отказы оборудования, возможность развития аварийной ситуации и её последствия. Разработан алгоритм нечетко-статистического моделирования подсистемы ЭЭС для оценки риска нарушения устойчивости ответственной двигательной нагрузки при случайных отказах оборудования. Проведено вероятностно-статистическое моделирование реальной подсистемы ЭЭС – схемы электроснабжения мощного химического завода. По его результатам определен риск снижения надежности подсистемы ЭЭС при нарушении устойчивости ответственного двигателя.

**Ключевые слова:** риск, устойчивость, надежность, отказ оборудования, нечетко-статистический метод, устойчивость двигательной нагрузки.

**Annotation.** The fuzzy-statistical risk estimation method of motor load stability failure in power subsystem is proposed as integral indicator of its reliability. This method allows to consideration equipment faults, possibility of system failure and failure's aftereffects. Algorithm of power subsystem fuzzy-statistical modeling for the risk estimation of motor load stability failure is proposed. Fuzzy-statistical modeling of real power subsystem – supply scheme of chemical plant is carried out. By its results, risk of subsystem reliability decreasing in the case of important motor stability failure is obtained.

**Key words:** risk, stability, reliability, equipment fault, fuzzy-statistical method, motor load stability.

**Вступ**

Функціонування ЕЕС України та її підсистем здійснюється за наступних умов:

- зношення електрообладнання складає 70...80%;
- темпи зростання кількості електрообладнання зі спрацьованим ресурсом сягає 2...6% на рік;
- напружений режим роботи електрообладнання за умов ринкових відносин;
- слабкі тенденції до заміни та модернізації зношеного обладнання.

Всі ці фактори спричиняють зростання кількості відмов електрообладнання, виникнення аварійних ситуацій, які призводять до зниження надійності електропостачання споживачів. Заміна та модернізація обладнання, які спроможні підвищити надійність електропостачання споживачів, потребують значних інвестицій і є тривалими у часі [1].

Прийняття достовірних рішень для забезпечення надійності функціонування підсистем ЕЕС потребує комплексного підходу, який би об'єктивно враховував наступні фактори:

- випадковість відмов електрообладнання;
- стохастичний характер режиму підсистеми ЕЕС;
- можливий сценарій розвитку аварії;
- економічні, екологічні та інші наслідки;
- неповноту та нечіткість вихідної інформації.

Світові тенденції розвитку методів та засобів забезпечення надійної роботи підсистем ЕЕС свідчать про зростання ролі ризик-менеджменту при прийнятті управлінських рішень [2]. Використання стратегії ризик-менеджменту при управлінні підсистемою ЕЕС потребує визначення ризику як інтегрального показника функціонування підсистеми ЕЕС, який дає можливість враховувати наведені вище фактори та більш повно і достовірно оцінювати стан підсистеми ЕЕС на відміну від детермінованого підходу.

**Постановка задачі**

Ризик зниження надійності підсистеми ЕЕС при всіх можливих відмовах обладнання та всіх можливих сценаріях розвитку аварії визначається як:

$$R = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n p(S_i) \cdot p(H_j / S_i) \cdot M_j, \quad (1)$$

де  $m$  – кількість можливих аварійних сценаріїв;

$n$  – кількість одиниць обладнання, встановленого у підсистемі ЕЕС;

$p(S_i)$  – імовірність відмови  $i$ -того елемента на інтервалі часу  $\Delta t$ ;

$p(H_j / S_i)$  – умовна імовірність виникнення  $j$ -тої аварійної ситуації в результаті відмови  $i$ -того елемента;

$M_j$  – наслідки виникнення  $j$ -тої аварійної ситуації.

Однією з найважчих аварійних ситуацій при відмовах обладнання є порушення стійкості двигунового навантаження, яке може призвести до значних матеріальних та економічних збитків [3].

Розглянемо задачу визначення ризику порушення стійкості двигунового навантаження в підсистемі ЕЕС, яка містить  $N$  одиниць електрообладнання. Для вирішення поставленої задачі необхідно, в першу чергу, визначити імовірність відмови електрообладнання на інтервалі часу  $\Delta t$ , для якого виконується оцінка ризику.

**Матеріали та результати дослідження**

Вирішення поставленої задачі здійснюється в умовах неповноти та нечіткості вихідної режимної інформації та інформації про технічний стан (ТС) обладнання [4, 5]. Неповнота режимної інформації полягає в наступному:

- відсутність достовірної інформації про коефіцієнти завантаження двигунів;
- відсутність повної інформації про режимні параметри вузлів навантаження;
- відсутність залежності між електричними параметрами двигунів (визначаються режимом ЕЕС) та їхніми механічними параметрами (визначаються технологічними режимами механізмів).

Неповнота інформації про ТС обладнання має наступний характер:

- відсутність математичного опису динамічних процесів, що проходять у обладнанні, в формі змінних стану, які дають повну оцінку його працездатності;

- вимірювання і спостереження ознак здійснюються з деякою мірою достовірності;
- обмежене число доступних вимірювань і нагляду діагностичних ознак;
- складність виявлення аналітичних залежностей взаємовпливу діагностичних ознак при оцінці ТС об'єкта.

Для рішення задачі за зазначених вище умов запропоновано використання інтегральних функцій розподілу імовірності відмови обладнання відповідного типу  $F(t)$ , які можуть бути отримані на основі статистичних даних по відмовах обладнання [6]. Ці функції мають бути уточнені для отримання індивідуальної характеристики конкретної одиниці обладнання з урахуванням її справного стану в момент спостереження (подія  $G$ ) та спрацьованого ресурсу (подія  $B$ ) [1].

Імовірність відмови  $i$ -тої одиниці обладнання (подія  $H_1$ ) за умови, що мала місце подія  $G$ , складає:

$$p_i(H_1) = \frac{F_i(t_2) - F_i(t_1)}{1 - F_i(t_1)}, \quad i = 1, \dots, n_1, \quad (2)$$

де  $F_i(t_1)$  та  $F_i(t_2)$  – значення функції розподілу імовірності відмови  $i$ -тої одиниці обладнання в моменти часу  $t_1$  та  $t_2$  відповідно.

Імовірність безвідмовної роботи  $i$ -тої одиниці обладнання (подія  $H_2$ , яка несумісна з подією  $H_1$ ) за умови, що мала місце подія  $G$ , складає:

$$p_i(H_2) = 1 - p_i(H_1), \quad i = 1, \dots, n_1. \quad (3)$$

Визначення спрацьованого ресурсу  $S_i$  кожної одиниці обладнання з множини  $N$  в момент спостереження  $t_1$  виконується за нечіткою моделлю об'єкта, принципи побудови якої викладені в [7]. Імовірність відмови  $i$ -тої одиниці обладнання на інтервалі часу  $\Delta t = t_2 - t_1$  визначається за формулою Байєса [8]:

$$p_i(H_1/B) = p_i(\Delta t) = \frac{p_i(H_1) \cdot p_i(B/H_1)}{p_i(H_1) \cdot p_i(B/H_1) + p_i(H_2) \cdot p_i(B/H_2)}, \quad i = 1, \dots, n_1. \quad (4)$$

де  $p_i(H_1/B)$  – імовірність відмови  $i$ -тої одиниці обладнання на інтервалі часу  $\Delta t$  при ТС  $B$ , який визначається спрацьованим ресурсом  $S_i$ ;

$p_i(B/H_1)$  – умовна імовірність наявності у  $i$ -тої одиниці обладнання ТС  $B$  при її відмові на інтервалі часу  $\Delta t$ ;

$p_i(B/H_2)$  – умовна імовірність наявності у  $i$ -тої одиниці обладнання ТС  $B$  при її безвідмовній роботі на інтервалі часу  $\Delta t$ .

Умовні імовірності  $p_i(B/H_1)$  та  $p_i(B/H_2)$  визначаються за допомогою композиційного правила Заде [9]:

$$P = R \circ S, \quad (5)$$

де  $R$  – матриця причинних відношень, побудована з використанням методу парних порівнянь Сааті [10], яка функціонально зв'язує фактичний ТС об'єкта з умовними імовірностями того, що даний ТС буде визначено;

$S$  – матриця, елементами якої є ступені приналежності даного ТС до нечітких множин станів об'єкта, у яких він знаходиться;

$P$  – матриця умовних імовірностей  $p(B/H_1)$  та  $p(B/H_2)$ ;

○ – означає максимінну композицію.

При змінюванні значень елементів матриць  $R$ , які є визначальними при виконанні максимінної композиції до значень, які відрізняються вдвічі, що є наслідком низької узгодженості думок експертів, значення імовірностей відмови вимикачів на інтервалі часу  $p(H_1/B)$  відрізняються на 5...10%. Отримані результати дозволяють зробити висновок про низьку чутливість запропонованого методу визначення імовірності відмови об'єкта на інтервалі часу з урахуванням ТС до суб'єктивності експертних оцінок при побудові матриць причинних відношень.

Виконується уточнення інтегральних функцій розподілу імовірності відмови для кожної

одиниці обладнання з підмножини  $N_1$ :  $F_{y_i}(t) = \{F_i(t); p_i(\Delta t)\}$ ,  $i = 1 \dots n_1$  на інтервалі часу  $\Delta t$  з урахуванням індивідуальних характеристик:

$$F_{y_i}(t_2) = F_i(t_1) + p_i(\Delta t), \quad i = 1, \dots, n_1. \quad (6)$$

Розглянемо підсистему ЕЕС, яка містить  $m$  вузлів та  $n$  одиниць обладнання (вимикачі, ЛЕП, трансформатори), які формують множину елементів підсистеми ЕЕС  $N$ .

Нечітко-статистичне моделювання підсистеми ЕЕС для оцінки ризику порушення стійкості відповідального двигунового навантаження при випадкових відмовах обладнання виконується за наступним алгоритмом:

1) З множини елементів підсистеми ЕЕС  $N$  виділяється підмножина елементів  $N_1$ , відмови яких призводять до переходу до резервних схем живлення вузла навантаження з відповідальним двигуном, за яких знижується запас його статичної стійкості або відбувається перерва в живленні відповідального двигуна на час спрацьовування АВР чи АПВ.

2) Визначається множина значень загальних ТС об'єктів  $S_1$  з підмножини  $N_1$  за допомогою нечітких моделей оцінки ТС обладнання.

3) За відомими інтегральними функціями розподілу імовірності відмови обладнання відповідного типу  $F(t)$  визначаються безумовні імовірності відмови та безвідмовної роботи елементів з підмножини  $N_1$  на момент часу  $t_1$ .

4) За допомогою матриць нечітких відношень між ТС об'єктів  $S_i$  та умовними ймовірностями їхньої відмови  $R_p$  і безвідмовної роботи  $R_Q$  шляхом виконання максимінної композиції нечіткого виводу Заде визначаються умовні імовірності відмови елементів обладнання  $p_i(B/H_1)$ ,  $i = 1, \dots, n$  та умовні імовірності їхньої безвідмовної роботи  $p_i(B/H_2)$ ,  $i = 1, \dots, n$  з урахуванням їхніх фактичних ТС.

5) За теоремою Байеса визначається множина імовірностей відмов окремих одиниць електрообладнання з урахуванням їхніх фактичних ТС на інтервалі часу  $\Delta t$ .

6) Виконується уточнення інтегральних функцій розподілу імовірності відмови для кожної одиниці обладнання з підмножини  $N_1$  на інтервалі часу  $\Delta t$  з урахуванням її індивідуальних характеристик.

7) Для кожної одиниці обладнання з підмножини  $N_1$  за допомогою генератора випадкових чисел (ГВЧ) визначається значення функції  $F(t)$  на момент відмови  $A$  на інтервалі  $[0;1]$ :

$$A = F_i(t_{відм}) = Random[0;1], \quad i = 1 \dots n_1. \quad (7)$$

8) З підмножини  $N_1$  виділяється підмножина об'єктів  $N_2$ , які відмовлять на інтервалі часу  $\Delta t$ :

$$F_i(t_{відм}) \in [F_{y_i}(t_1); F_{y_i}(t_2)], \quad i = 1 \dots n_1. \quad (8)$$

9) З підмножини  $N_2$  обирається елемент, який, з урахуванням власних індивідуальних характеристик, відмовить першим на інтервалі  $[t_1; t_2]$ :

$$t_{відм} = \min \{F_i^{-1}(A)\}, \quad i = 1 \dots n_2. \quad (9)$$

10) Розглядається відповідна резервна схема живлення вузла навантаження з відповідальним двигуном залежно від того, який з елементів мережі відмовив першим на інтервалі  $[t_1; t_2]$ .

11) З відомого зі статистичних даних розподілу значень напруги у вузлі приєднання розглядуваної підсистеми до ЕЕС за допомогою ГВЧ визначається значення напруги у вузлі приєднання підсистеми в момент спостереження як імовірність появи величини напруги залежно від її тривалості:

$$p(U_i) = Random[1;0] \rightarrow U_i; \quad i = 1 \dots k. \quad (10)$$

12) За допомогою ГВЧ задається значення коефіцієнта завантаження відповідального двигуна з діапазону можливих робочих потужностей механізму, що приводиться  $[K_{ЗАВАНТ}^{MIN}; K_{ЗАВАНТ}^{MAX}]$ :

$$K_{ЗАВАНТ}^i = Random[K_{ЗАВАНТ}^{MIN}; K_{ЗАВАНТ}^{MAX}], \quad i = 1 \dots k. \quad (11)$$

13) Розраховуються перехідний та усталений режими підсистеми ЕЕС за визначених умов та оцінюється динамічна та статична стійкість відповідального двигуна у цих режимах.

14) Пункти 7–13 алгоритму оцінки ризику порушення стійкості відповідального двигуна реалізуються  $k$  разів. У випадку коли  $N_2 \neq \emptyset$  (жоден елемент не відмовив на інтервалі часу

$[t_1; t_2]$ ), пункти 9, 10 алгоритму не виконуються.

15) З отриманої множини  $K$  режимів вузла навантаження з відповідальним двигуном виділяється підмножина режимів  $K_1$ , у яких спостерігалось порушення статичної та/або динамічної стійкості відповідального двигуна.

16) Визначається імовірність порушення стійкості відповідального двигуна за умови відмови електрообладнання у підсистемі ЕЕС як співвідношення кількості режимів  $k_1$ , за яких спостерігалось порушення статичної стійкості відповідального двигуна до загальної кількості реалізованих за допомогою статистичного моделювання режимів  $k$ :

$$p = \frac{k_1}{k} \quad (12)$$

17) Визначається величина наслідків (економічних втрат) від порушення стійкої роботи відповідального двигуна:

$$M = M_0 \cdot C \cdot T, \quad (13)$$

де  $M_0$  – недовирібок продукції за одиницю часу, \$;

$C$  – ціна одиниці продукції;

$T$  – час, необхідний на відновлення технологічного процесу.

18) Визначається ризик порушення статичної стійкості відповідального двигуна при переході на ремонтну схему живлення вузла навантаження внаслідок відмови електрообладнання:

$$R = p \cdot M \quad (14)$$

За запропонованим алгоритмом виконано оцінку ризику порушення стійкості відповідального асинхронного двигуна, встановленого у схемі електропостачання потужного хімічного заводу (рис.1). Найбільш відповідальним споживачем в цій підсистемі ЕЕС є асинхронний двигун АД4, який є приводом компресорної установки, що задіяна у технологічній лінії виробництва аміаку.

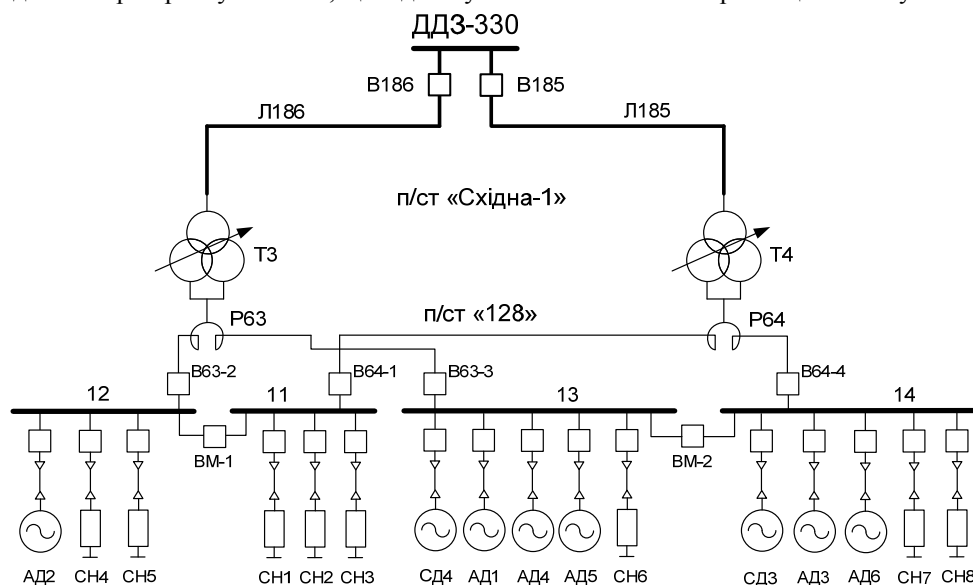


Рис.1. Схема електропостачання хімічного заводу

За результатами обробки статистичних даних побудовано функцію розподілу напруги у вузлі приєднання розглядуваної підсистеми до ЕЕС протягом року (рис.2).

Відповідальний двигун АД4 знаходиться на секції №13. Загальна кількість елементів у підсистемі  $n = 28$ . В разі відмови ЛЕП, силових трансформаторів, повітряних вимикачів ліній та ввідних вимикачів секцій (окрім В63-2) відбувається перехід до резервних схем живлення, що спричиняє зниження напруги на секції №13, яка містить відповідальний двигун, або перерву у його живленні на час АВР. Таким чином,  $n = 9$ .

За результатами статистичного моделювання сформовано множину режимів  $K$ . За допомогою ГВЧ визначено:

- 1) значення інтегральних функцій розподілу імовірностей відмови елементів з підмножини  $N_1$  на момент їхньої відмови;

- 2) значення напруги у вузлі приєднання розглядуваної підсистеми до ЕЕС згідно з графіком розподілу рівнів напруги протягом року;
- 3) коефіцієнт завантаження відповідального двигуна АД4 з діапазону можливих робочих потужностей компресора  $[0,9P_{НОМ}; P_{НОМ}]$ .

Кількість реалізацій статистичного моделювання режиму підсистеми ЕЕС  $k = 500$ . Деякі результати розрахунків режимів секції навантаження №13 та оцінки стійкості відповідального двигуна АД4 наведено в табл.1.

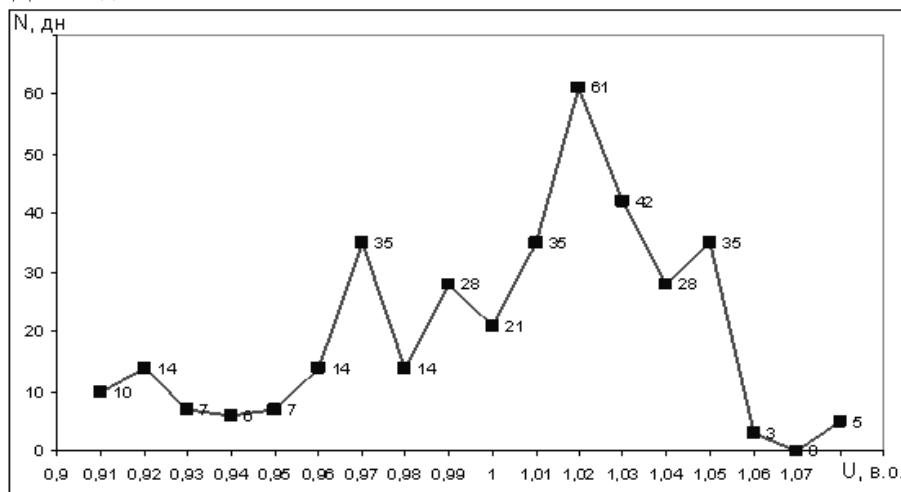


Рис.2. Розподіл рівнів напруги у вузлі приєднання підсистеми до ЕЕС

Таблиця 1

Результати розрахунків режимів підсистеми ЕЕС для оцінки стійкості двигуна АД4

№	Об'єкт, що відмовить першим на $[t_1; t_2]$	U вузла приєдн.	$K_{ЗАВ}$ АД4	Оцінка статичної стійкості	Оцінка динамічної стійкості
1	—	0,95	0,92	стійкий	—
2	ТЗ	0,91	0,93	стійкий	успішний с/з
3	—	1,02	0,94	стійкий	—
4	В186	0,98	0,92	стійкий	успішний с/з
5	—	1,04	0,91	стійкий	—
6	В186	1,03	0,97	стійкий	успішний с/з
7	Л186	0,91	0,98	стійкий	<b>неуспішний с/з</b>
8	В186	0,99	0,93	стійкий	успішний с/з
9	Л185	0,99	0,99	стійкий	успішний с/з
...	...	...	...	...	...
500	В64-4	1	0,99	стійкий	успішний с/з

На рис.3 показана гістограма розподілу значень часу самозапуску відповідального двигуна АД4. Останній стовпчик відповідає неуспішному самозапуску).

За результатами статистичного моделювання визначено, що підмножина режимів, у яких двигун АД4 є нестійким, складає  $k_1 = 18$  режимів. Таким чином, імовірність порушення стійкості відповідального двигуна АД4 за відмови обладнання у підсистемі ЕЕС дорівнює:

$$p = \frac{k_1}{k} = \frac{18}{500} = 0,036. \quad (15)$$

В разі зупинки компресора, залежно від етапу хімічного виробництва, на відновлення технологічного циклу потрібно до 4-х годин. Згідно зі звітними даними [11], за рік на підприємстві виробляється 520 тис. тонн аміаку. Оскільки технологічна лінія виробництва аміаку є неперервною, то можна вважати, що за 1 годину виробляється:

$$M_0 = \frac{M}{\tau} = \frac{520000}{8760} \approx 59,3 \text{ т / год}. \quad (16)$$

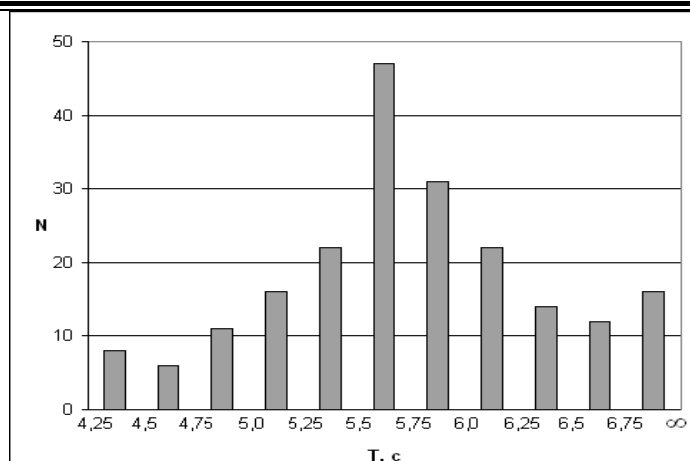


Рис.3. Гістограма розподілу значень часу самозапуску двигуна АД4 при імовірісно-статистичному моделюванні підсистеми ЕЕС

Відпускна ціна 1 тонни аміаку складає 4320 гривень [12]. Таким чином, збитки заводу від чотирьохгодинного простою технологічної лінії виробництва аміаку складуть:

$$M = M_0 \cdot C \cdot T = 59,3 \cdot 4320 \cdot 4 = 1025000 \text{ грн.}$$

Ризик зниження надійності підсистеми ЕЕС внаслідок порушення стійкості відповідального двигуна АД4 при переході до резервної схеми живлення секції №13 підстанції внаслідок відмов електрообладнання дорівнює:

$$R = p \cdot M = 0,036 \cdot 1025000 = 36900 \text{ грн.} \quad (17)$$

### Висновки

Для отримання достовірної оцінки надійності функціонування підсистем ЕЕС доцільно використовувати як інтегральний показник ризик зниження надійності, який враховує три основні фактори: відмови обладнання, можливість розвитку аварійної ситуації, матеріальні, економічні та інші наслідки. Це дозволить управлінському персоналу приймати ефективні гнучкі рішення при розробці заходів для зниження отриманої величини ризику.

Запропонований підхід до оцінки ризику порушення стійкості двигунового навантаження можна використовувати і для інших режимних ситуацій, таких як перевантаження електрообладнання, виникнення асинхронного режиму в ЕЕС, порушення стійкості за напругою та ін.

### Література

1. Костерев М.В., Бардик Є.І., Литвінов В.В. Оцінка імовірності відмови електрообладнання при керуванні режимами електричної системи. – Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Серія: «Електротехніка і енергетика», випуск 11 (186). – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ». – 2011. – С. 199–204.
2. Handschin E., Jurgens I., Neumann C., Rehtanz C. Long term optimization for risk-oriented asset management. – 16th Power Systems Computation Conference (PSCC). – Glasgow, Scotland. – 2008.
3. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Хачатрян Э.А. Устойчивость нагрузки электрических систем. – М.: Энергоиздат. – 1981. – 209 с.
4. Литвинов В.В., Костерев Н.В., Денисюк П.Л. Исследование статической устойчивости промышленного узла нагрузки с помощью нечетких моделей. – Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2009. – №1. – С. 57–64.
5. Литвинов В.В. Построение модели исследования статической устойчивости узла нагрузки энергосистемы с помощью метода парных сравнений. – Технічна електродинаміка. – 2010. – Тематичний випуск, частина 2. – С. 91–95.
6. Абдурахманов А.М., Мисриханов М.Ш., Шунтов А.В. Анализ моделей отказа выключателей в схемах коммутации электроустановок. – Электричество. – 2007. – №4. – С. 2–11.
7. Костерев М.В., Бардик Є.І. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем. – К.: НТУУ «КПІ». – 2011. – 141 с.
8. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Советское радио. – 1972. – 552 с.
9. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком. – 2007. – 288 с.
10. Saaty T.L. Eigenweightor an logarithmic lease squares.- Eur. J. Oper. Res.-1990.-48, N1.-P.156–160.

11. <http://rg.kiev.ua/page5/article5389>
  12. <http://agrofert.com.ua/news/news-1.html>
- 
-