

МОДЕЛІ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ АЕС ВІД НЕЗАЛЕЖНИХ ДЖЕРЕЛ ПРИ НЕЧІТКО ЗАДАНИХ ПАРАМЕТРАХ ВІДМОВ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Є.І. Бардик, канд. техн. наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна
Тел./факс +38(044)-241-76-33, e-mail: kafedra_et@fea.kpi.ua.

Проведено аналіз проблеми забезпечення надійності електропостачання власних потреб АЕС в умовах аварійної втрати електричних зв'язків з енергосистемою. Запропоновано підхід і нечітку математичну модель для оцінки ризику відмови систем електропостачання власних потреб електростанції від зовнішніх джерел. Бібл. 11, рис. 3, табл. 2.

Ключові слова: надійність, власні потреби, нечіткі множини, відмови, електростанція.

Вступ. Аналіз умов функціонування сучасних енергосистем України, Росії та інших промислово розвинених країн показує, що існує стійка тенденція до підвищення аварійності, пов'язаної в першу чергу зі старінням електрообладнання, складними метеоумовами й іншими факторами [6, 8]. Підтвердженням цьому є низка крупних аварій, що виникли на початку минулого десятиріччя в електроенергетичних системах (ЕЕС) Північної Америки і Західної Європи, які супроводжувались порушенням електропостачання споживачів. Особливо небезпечним є знеструмлення споживачів ВП АЕС, оскільки може призвести до порушення ядерної безпеки станції [5, 9].

Статистичні дані показують, що імовірність пошкодження або відключення повітряних ліній (ПЛ), які зв'язують АЕС з системою внаслідок внутрішніх і зовнішніх впливів стихійних явищ, повністю не виключена. При цьому можлива повна втрата електричних зв'язків АЕС з ЕЕС з вимкненням всієї станції, яке супроводжується аварійним розхолодженням всіх реакторних блоків і визначає високу імовірність каскадного розвитку аварії в енергосистемі з порушенням електропостачання окремих регіонів. В умовах аварійної втрати електричних зв'язків АЕС з ЕЕС вимогами енергосистеми диктується необхідність швидкого запуску енергоблоків АЕС, для чого необхідно здійснити живлення робочих або резервних трансформаторів ВП від незалежного генеруючого джерела. При цьому важливим є забезпечення високої надійності схем подачі живлення на шини високої напруги АЕС від віддалених електростанцій або підстанцій. У зв'язку з цим потрібна розробка адекватних математичних моделей для оцінки надійності електропостачання споживачів ВП АЕС від зовнішніх незалежних джерел живлення.

Постановка задачі. Як основний показник надійності електропостачання системи ВП АЕС від зовнішніх джерел використовуємо імовірність її безвідмовної роботи $P_{EP}^{ВП}$ на інтервалі часу τ (квартал, один рік), яка залежить від відповідних характеристик надійності окремих елементів, зокрема, від інтенсивності потоку відмов λ_{e_i} та імовірності безвідмовної роботи P_{e_i} або імовірності відмови F_{e_i} . Оцінка надійності електропостачання споживачів ВП АЕС на основі імовірнісного підходу суттєво залежить від достовірності визначення ймовірності відмови кожної одиниці електрообладнання енергосистеми, яка визначається з відповідних моделей відмов [10].

Аналіз статистичних даних по відмовах електрообладнання різних типів і класів напруги показує, що навіть для однотипного електрообладнання, у межах одного класу напруги значення інтенсивностей відмов змінюється в широких межах. Так, наприклад, для високовольтних повітряних вимикачів напругою 330 кВ інтенсивність відмов λ змінюється в межах 0,03...0,2 на рік, що пояснюється різним віковим складом обладнання, конструктивними особливостями виготовлення, різними умовами експлуатації. Неточність визначення $P(t)$ при змінній інтенсивності відмов λ може сягати більше 100 % і суттєво залежить від терміну експлуатації електрообладнання на момент проведення розрахунку.

Таким чином, за відсутності статистично достовірної інформації щодо значень параметрів технічного стану, значної нечіткості перш за все параметра інтенсивностей відмов λ електрообладнання, для визначення показників надійності окремих одиниць електрообладнання і схем електричних з'єднань АЕС, на відміну від підходу, запропонованого в [9], застосування теорії нечітких множин для побудови моделей відмов об'єкта є найбільш прийнятним [4, 6, 11] і дає можливість більш об'єктивно та адекватно оцінювати ризик виникнення аварій при відмовах електрообладнання.

Математична модель для оцінки надійності електропостачання ВП АЕС від зовнішніх джерел. За наявності на АЕС розподільних пристроїв напругою 750 і 330 кВ і напруги на системі шин 330 кВ, до яких приєднані резервні трансформатори ВП, пуск кожного блока можна здійснити за допомогою магістралі резервного живлення ВП 6 кВ. При цьому живлення від зовнішньої мережі можливе від двох систем незалежних джерел, одна з яких здійснює подачу живлення безпосередньо на СШ 330 кВ, а інша – на СШ 750 кВ. Кожне коло подачі живлення від джерел незалежного живлення є відповідною радіальною схемою, що складається з послідовно-паралельного з точки зору надійності з'єднання елементів.

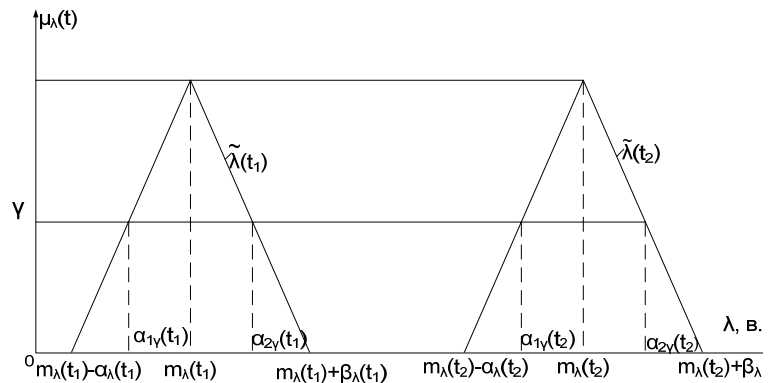


Рис. 1

Імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ і відмов електрообладнання $F(t)$ пов'язана з інтенсивністю відмови λ і часом t та згідно з [2, 10] визначається як $P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$, $F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$. Для нечіткої інтенсивності відмов $\tilde{\lambda}(t)$, яка змінюється у часі, можна записати: $\tilde{\lambda}(t) = \{ \lambda, \mu_{\tilde{\lambda}(t)}(\lambda), \lambda \in X \}$, де X – універсальна множина.

Якщо функція $\varphi: X \rightarrow U$ є обмежена, неперервна і диференційована та визначена на універсальній множині U та $p = \varphi(\lambda)$, то функція належності для нечіткої надійності \tilde{P} , яка формується за принципом розширення $\tilde{P} = \{ p, \mu_{\tilde{P}(t)}(p) | p = \varphi(\lambda), p \in U \}$, визначається як $\mu_{\tilde{\lambda}(t)} = \sup_{\lambda \in X} \{ \mu_{\tilde{\lambda}(t)}(\lambda) | P = \varphi(\lambda) \}$, де $\lambda \in X$.

При представленні інтенсивності відмов трикутними нечіткими числами (рис. 1) вираз для $\lambda(t)$ на γ -рівні має такий вигляд: $\tilde{\lambda}(t) = [m(t) - \alpha(t) + \gamma\alpha(t), m(t), m(t) + \beta(t) - \gamma\alpha(t)]$, $\gamma \in [0, 1]$, де $\alpha(t) \geq 0$, $\beta(t) \geq 0$ – ліве та праве розширення на інтервалі часу.

Враховуючи, що $\tilde{\lambda}(t) = [m(t) - \alpha(t), m(t), m(t) + \beta(t)]$, вирази для лівої і правої форм функції належності $\mu_{\tilde{P}(t)}$ нечіткої надійності в загальному випадку визначаються [3, 4, 11] так:

$$\mu_{\tilde{P}(t)}(P) = \left\{ \begin{array}{l} \left[\ln(p) + \int_0^t (m(t) + \beta(t)) dt \right] / A, e^{-\int_0^t (m(t) + \beta(t)) dt} \leq P \leq e^{-\int_0^t m(t) dt}, \text{ де } A = \int_0^t \beta(t) dt \\ \left[\ln(p) + \int_0^t (m(t) - \alpha(t)) dt \right] / B, e^{-\int_0^t m(t) dt} \leq P \leq e^{-\int_0^t (m(t) - \alpha(t)) dt}, \text{ де } B = \int_0^t \alpha(t) dt \end{array} \right\}.$$

За роботами [6, 7, 10] імовірність безвідмовної роботи елемента на інтервалі напрацювання $\Delta t = t_2 - t_1$ за умови, що об'єкт був працездатний на початок інтервалу, визначається як $\tilde{P}(t_2; t_1) = \frac{\tilde{P}(t_1 + \Delta t)}{\tilde{P}(t_1)}$.

Визначення міри можливості появи вершинної події у випадку об'єднання підмножини подій логічною умовою "І" в декомпозизованій на окремі блоки моделі з послідовним, паралельним та змішаним з'єднанням елементів здійснюється шляхом n -го перетворення мо-

жливості їх одночасної появи [3, 4]: $\tilde{P}_{Y \otimes} = \prod_{i=1}^n \tilde{P}_i = \tilde{P}_1 \wedge \tilde{P}_2 \wedge \tilde{P}_3 \dots \wedge \tilde{P}_n$, де $\prod_{i=1}^n P_i$ – знак нечіткого перемноження параметрів можливості; $\tilde{P}_Y, \tilde{P}_Y = Poss(i)$ – міри можливості появи результуючої події Y і передумов $i \in n$, що складають Y , які виражені нечіткими числами в апроксимованій $L-R$ формі відповідно. Значення лівої частини формули розраховується за допомогою співвідношень

$$\tilde{P}_{Y \otimes} = (m_Y, \alpha_Y, \beta_Y) = (m_{P_1}, \alpha_{P_1}, \beta_{P_1}) \otimes (m_{P_2}, \alpha_{P_2}, \beta_{P_2}) \otimes \dots \otimes (m_{P_{n-1}}, \alpha_{P_{n-1}}, \beta_{P_{n-1}}) \otimes (m_{P_n}, \alpha_{P_n}, \beta_{P_n}) \otimes \dots \otimes (m_{r_{i-1}} \cdot m_{P_i}, m_{r_{i-1}} \cdot \alpha_{P_i} + m_{P_i} \cdot \alpha_{r_{i-1}} - \alpha_{P_i} \cdot \alpha_{r_{i-1}}, m_{r_{i-1}} \cdot \beta_{P_i} + m_{P_i} \cdot \beta_{r_{i-1}} + \beta_{P_i} \cdot \beta_{r_{i-1}})_{i=n},$$

де \otimes – операція логічного перемноження нечітких чисел $L-R$ форми; $m_{r_i}, \alpha_{r_i}, \beta_{r_i}$ – рекурсивні члени, які розраховуються за формулами, наведеними в роботі [3].

У випадках, коли задані нечіткими числами події-передумови з'єднуються логічною умовою "АБО", вираз для міри можливості реалізації такої результуючої події визначається

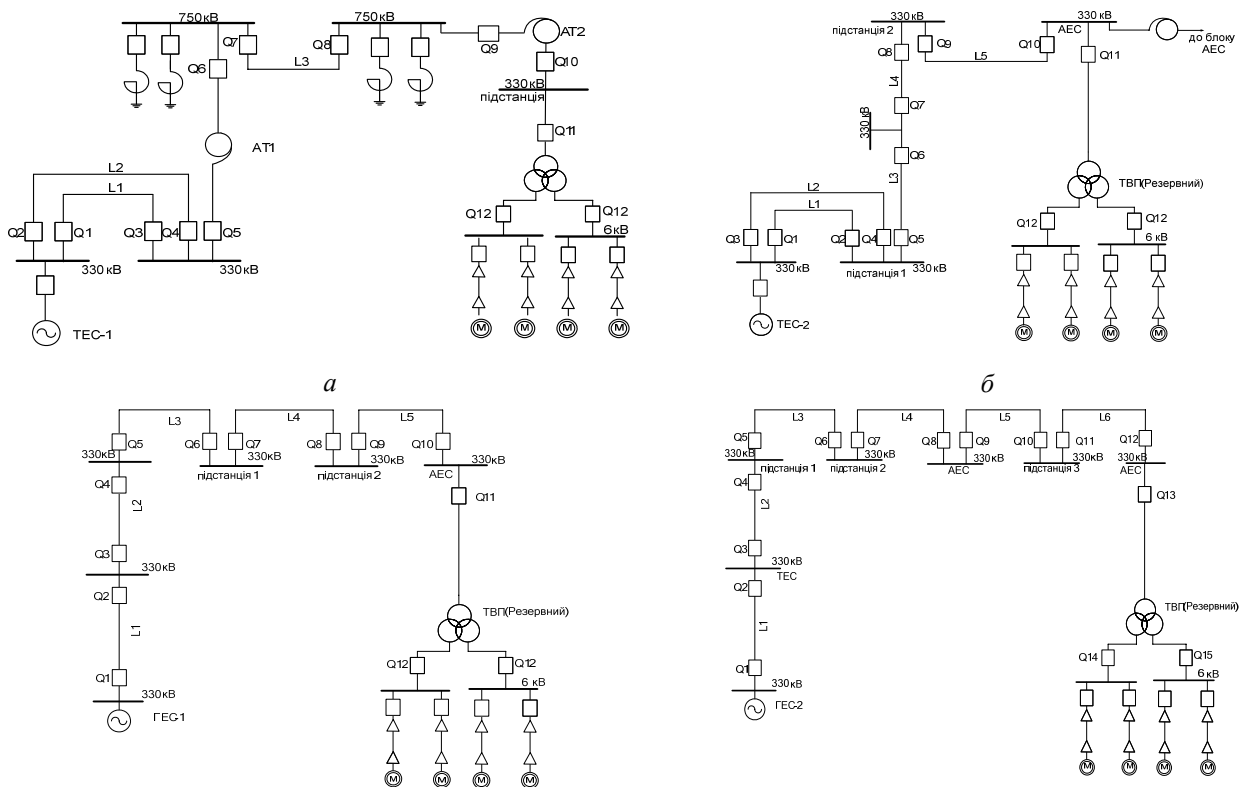
$$[3, 4] \text{ як } \tilde{P}_Y = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{P}_i) = \tilde{P}_1 \vee \tilde{P}_2 \vee \tilde{P}_3 \vee \dots \vee \tilde{P}_n. \text{ Формули для визначення міри можливості появи результуючої події } Y \text{ в даному випадку мають вигляд}$$

$$\tilde{P}_{\oplus Y} = (m_Y, \alpha_Y, \beta_Y) = 1 - \left[m_{r_{i-1}} (1 - m_{P_i}), m_{r_{i-1}} \cdot \alpha_{P_i} + (1 - m_{P_i}) \cdot \alpha_{r_{i-1}} - \alpha_{P_i} \cdot \alpha_{r_{i-1}}, m_{r_{i-1}} \cdot \beta_{P_i} + (1 - m_{P_i}) \cdot \beta_{r_{i-1}} + \beta_{P_i} \cdot \beta_{r_{i-1}} \right],$$

де $m_{r_i}, \alpha_{r_i}, \beta_{r_i}$ – рекурсивні члени, які визначаються за співвідношеннями, наведеними в [3].

Використовуючи наведені формули, можна виконати наближене інтервальне оцінювання нечіткого прогнозу ймовірності виникнення аварійної відмови окремих елементів і підсистеми електропостачання споживачів у цілому.

Результати розрахунку. Для визначення показників надійності схем подачі живлення від автономних незалежних джерел живлення на шини РП високої напруги АЕС на інтервалі спостереження один рік розглянемо чотири гіпотетичні варіанти схем з різним складом і терміном напрацювання силового і комутаційного обладнання, які показані на рис. 2, де зображено розрахункові схеми подачі живлення на шини підключення резервних трансформаторів ВП АЕС напругою 330 кВ: *a* – від ТЕС-1; *б* – від ТЕС-2; *в* – від ГЕС-1; *г* – від ГЕС-2.



Таблиця 1

Назва елементів	Позначення елемента на схемі	Термін напрацювання, рік	Параметри функцій нечіткої надійності для моментів часу t_1 і t_2					
			$P(t_1)$	α_1	β_1	$P(t_2)$	α_2	β_2
Високовольтні вимикачі	Q7, Q8	27	0,3251	0,0270	0,0270	0,2991	0,0280	0,0280
	Q5, Q6	29	0,2745	0,0290	0,0290	0,2511	0,0300	0,0300
	Q3, Q4	27	0,3251	0,0270	0,0270	0,2991	0,0280	0,0280
	Q1, Q2	25	0,3806	0,0248	0,0248	0,3523	0,0259	0,0259
	Q9, Q10	28	0,2991	0	0	0,2745	0	0
Повітряні лінії	L3	27	0,6973	0,0125	0,0127	0,6883	0,0127	0,0130
	L2	27	0,6973	0,0125	0,0127	0,6883	0,0127	0,0130
	L1	25	0,7161	0,0119	0,0121	0,7065	0,0122	0,0124
Силові трансформатори	AT2	28	0,4429	0	0	0,4328	0	0
	AT1	29	0,4328	0,0177	0,0185	0,4229	0,0178	0,0186

Показники надійності будемо розраховувати на інтервалі спостереження один рік. Вихідні дані за параметрами надійності елементів схеми подачі живлення від ТЕС-1 наведено в табл. 1. Базові функції нечіткої надійності $\tilde{P}(t)$ окремих елементів розрахункових схем подачі живлення на шини високої напруги підключення резервних трансформаторів ВП АЕС на інтервалі напрацювання від 0 до 50 років представлено на рис. 3, де a – функція нечіткої надійності для ЛЕП-L1; b – функція нечіткої надійності мережевого автотрансформатора AT1; v – функція нечіткої надійності мережевого автотрансформатора AT2; z – функція нечіткої надійності високовольтного повітряного вимикача.

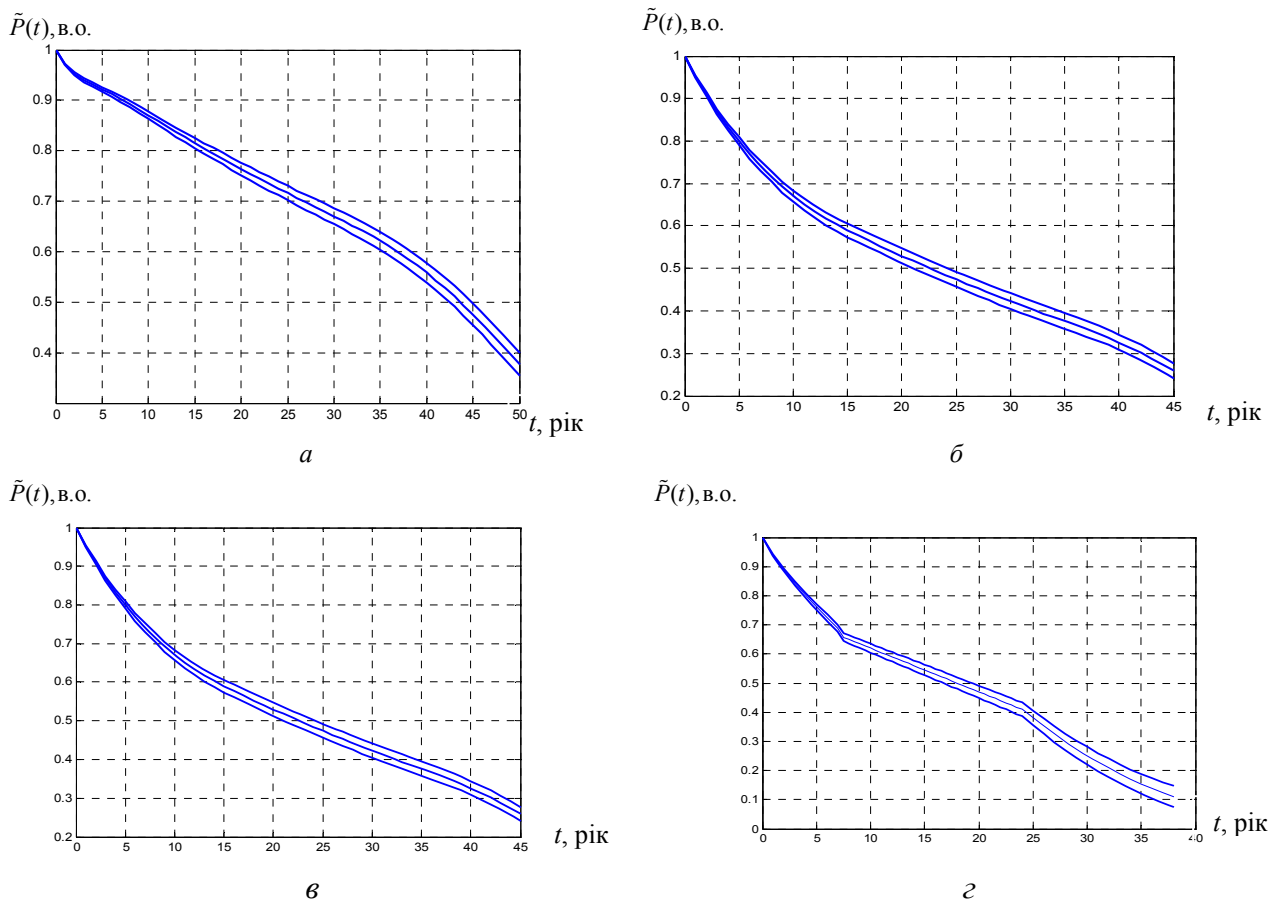
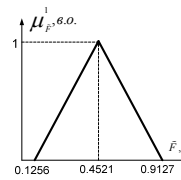
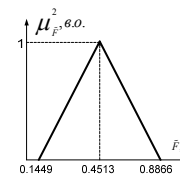
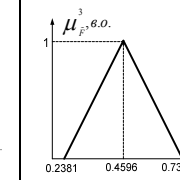
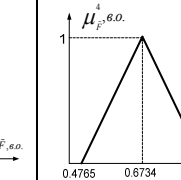
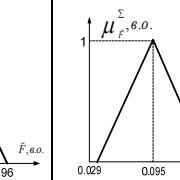


Рис. 3

Результати розрахунку нечіткої імовірності відмов схем подачі живлення від незалежних джерел наведено в табл. 2.

Висновки. Обґрунтовано необхідність і доцільність використання теорії нечітких множин для побудови адекватних математичних моделей відмов електрообладнання енергосистем з АЕС. Розроблено нечітку математичну модель для оцінки надійності схем електропостачання ВП АЕС

Таблиця 2

Номер схеми	1	2	3	4	$\Sigma 1+2+3+4$
Нечітка імовірність відмови схем \tilde{F}	(0,4521;0,3265; 0,4606)	(0,4513;0,3064; 0,4353)	(0,4596;0,2215 0,2736)	(0,6734; 0,1969;0,2866)	(0,087;0,058; 0,135)
Функції належності нечіткої імовірності відмови					

від незалежних джерел живлення. Наведено результати розрахунків нечіткої імовірності відмови тестових схем подачі живлення від зовнішніх джерел на шини високої напруги АЕС.

1. Бардик Є.І., Костерев М.В., Литвинов В.В. Оцінка імовірності відмови електрообладнання при керуванні режимами електричної системи: Зб. пр. V міжнар. наук.-техн. конф. "Керування режимами роботи об'єктів електричних та електромеханічних систем - 2011", м. Святогорськ.
2. Бардик Є.І., Костерев М.В., Литвинов В.В. Параметрична ідентифікація нечітких моделей електрообладнання електричних систем // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2011. – № 1.
3. Белов П.Г. Теоретические основы системной инженерии безопасности. – М.: ГН ТП "Безопасность", МИГ СТС, 1996. – 424 с.
4. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования. – Рига: Зинатне, 1990.
5. Костерев Н.В., Бардик Е.И., Яновский В.П., Бондаренко В.И. Моделирование динамики АЭС в аварийных режимах снижения напряжения и частоты в системе собственных нужд // Техн. электродинамика. Темат. вып. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2004. – Ч.7. – С. 31–37.
6. Костерев М.В., Бардик Є.І. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем. – К.: НТУУ КПІ, 2010. – 131 с.
7. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования. – Иваново: ИГЭУ, 2005. – 224 с.
8. Ситников В.Ф., Скопичев В.А. Вероятностно-статистический подход к оценке ресурсов электросетевого оборудования в процессе эксплуатации // Электричество. – 2007. – № 11. – С. 9–15.
9. Скопичев В.А. Оценка надежности электрических связей АЭС с энергосистемой для питания резервного трансформатора собственных нужд от внешних источников // Электроэнергетика России: современное состояние, проблемы и перспективы: Сб. науч. тр. / Под ред. М.Ш. Мисриханова, Д.Р. Любарского, З.Л. Шунина. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 176 с.
10. Эндрени Дж. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 336 с.
11. Cai K.-Y., Wen C.-Y. and Zhang M.-L. Fuzzy variables as a basic for a theory of fuzzy reliability in the possibility context // Fuzzy Set and Systems 42. – 1991. – P. 145–172.

УДК 621.311

Е.И. Бардик, канд. техн. наук

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт",
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

Модели оценки надежности схем электроснабжения собственных нужд АЭС от независимых источников при нечетко заданных параметрах отказов электрооборудования

Проведен анализ проблемы обеспечения надежности электроснабжения собственных нужд АЭС в условиях аварийной потери электрических связей с энергосистемой. Предложены подход и нечеткая математическая модель для оценки риска отказа систем электроснабжения собственных нужд электростанции от внешних источников. Библи. 11, рис. 3, табл. 2.

Ключевые слова: надежность, собственные нужды, нечеткие множества, отказы, электростанция.

E.I. Bardyk

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

Models of reliability assessing of electricity supply of auxiliary NPP from external sources with fuzzy defined parameters of failures of equipments

The analysis of the ensuring reliable power supply of the auxiliary systems of the nuclear power plant (NPP) under emergency loss of the electrical communication with the power grid has been performed. The approach and fuzzy mathematical model for the risk failure assessment of the power supply of the auxiliary systems of the power plant from the external power grid have been proposed. References 11, figures 3, tables 2.

Key words: reliability, auxiliary, fuzzy sets, failures, power plant.

Надійшла 12.02.2014

Received 12.02.2014