

# ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.311

Є.І. Бардик

Національний технічний університет України “КПІ”, Київ, Україна

## МОДЕЛЮВАННЯ Й ОЦІНКА РИЗИКУ ВІДМОВИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ВІД ЗОВНІШНІХ НЕЗАЛЕЖНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ

**Problematics.** In the conditions of objectively existing aging of electric equipment, climatic conditions deterioration, hard work schedule of operation personnel at modern EES of NPS, there grows the problem of ensuring reliability and safety of functioning of the NPS in the emergencies in a power supply system. That requires carrying out the complex risk analysis of EES subsystems and NPS operation in the case of refusal of electrical equipment.

**Research objective.** Development of mathematical support and software for assessment of circuits reliability and refusal risk of NPS MV external power supply system under conditions of internal MV power supply loss for providing the mode of shut-down cooling and cold start of the block.

**Implementing procedure.** In the condition of essential incompleteness and uncertainty of statistical information on refusals of external network electric equipment, the hybrid fuzzy-stochastic models of certain electrical equipment failure for an assessment of refusal risk of NPP MV external power source method of electrical equipment failure function of distribution is attached. It is based on use of statistical data on refusals of main population of certain type and voltage class electric equipment as well as the expert estimates of refusal intensity of certain units of equipment.

**Results of research.** The hybrid fuzzy-stochastic models of refusals of the main power and switching equipment of power supply systems and own needs of the NPS and fuzzy-stochastic models of refusal risk assessment of MV external power supply system are developed. The probability assessment of no-failure operation and fuzzy ranging on reliability is carried out for four versions of power supply circuits of the NPS HV distributing device; the refusal risk assessment of the external power supply system from remote power plants and substations is executed.

**Conclusions.** In order to estimate schemes reliability and risk failure of electrical equipment and system of power supply MV from external supplies, fuzzy mathematical models were developed and failure risk estimation of four power supplies schemes for high-voltage NPS highways.

**Keywords:** Nuclear Power Plant; reliability; risk; failure; fuzzy sets; probability; electric power supply.

### Вступ

Особливістю функціонування сучасних енергосистем України та інших промислово розвинених країн є стійка тенденція до підвищення аварійності, пов'язана насамперед зі старінням електрообладнання, складними метеоумовами, напруженим режимом роботи оперативного персоналу.

Почастішали системні аварії, які викликають знеструмлення власних потреб (ВП) електростанцій і тим самим сприяють розвитку аварії в електроенергетичній системі (ЕЕС). Особливо небезпечним є знеструмлення споживачів ВП атомних електростанцій (АЕС), оскільки це може призвести до зменшення потужності та порушення ядерної безпеки АЕС.

Аварії, пов'язані із втратою зовнішніх джерел електропостачання ВП АЕС Швеції (2006 р.), США (2005 р.), Великобританії (2005 р.) і особливо Японії (2011 р.), які призвели або могли призвести до серйозного порушення рівня безпеки атомних енергоблоків, сприяли виробленню відповідних рішень щодо забезпечення постійного моніторингу роботи АЕС із системою ВП та сумісності АЕС з електричною мережею [1].

Аналіз аварійності [2–4] в ЕЕС з АЕС показує, що можливість повної втрати електричних зв'язків станції з енергосистемою внаслідок пошкодження або відключення повітряних ліній (ПЛ) повністю не виключена. Внаслідок цього збурення можливе погашення всієї АЕС з аварійним розхолодженням всіх реакторних блоків визначає високу імовірність каскадного розвитку аварійної ситуації в ЕЕС, яка супроводжується значним порушенням електропостачання споживачів окремих регіонів. В умовах значної аварійної втрати потужності на АЕС потрібно забезпечити швидкий запуск енергоблоків АЕС, для чого необхідно здійснити заживлення робочих або резервних трансформаторів ВП від незалежного генеруючого джерела [3, 4].

Тому потрібна оцінка надійності схем електропостачання споживачів ВП АЕС від зовнішніх незалежних джерел живлення, яку необхідно виконувати разом з аналізом найбільш несприятливих режимів роботи електричної мережі. Зокрема, мають також визначатися показники статичної та динамічної стійкості ЕЕС з АЕС [3–7].

У зв'язку зі значними збитками, які супроводжують порушення електропостачання спо-

живачів унаслідок аварійного обмеження потужності на АЕС, та можливою втратою власних джерел електропостачання ВП в Україні й інших технічно розвинених країнах ведеться розробка математичного і програмного забезпечення оцінки надійності та управління ризиком експлуатації ЕЕС [2–7]. Програмні комплекси “MEXICO” (EDF, Франція), “SECRET” (ENEL, Італія), “COMREL” (Канада), “TRELSS” (EPRI, США), “ПОТОК” (СЕС СВ РАН) [8–11] дають змогу з різним ступенем деталізації враховувати різні експлуатаційні фактори в моделях відмов електрообладнання і визначати відповідні показники надійності при статистичному моделюванні випадкових процесів у ЕЕС.

Але більшість із них комплексно (системно) не враховують при аналізі ризику експлуатації та формуванні моделей відмов основного силового і комутаційного електрообладнання реальний технічний стан і рівень відновлення ресурсу після ремонту електрообладнання ЕЕС. У програмному комплексі “RISK-ЕЕС” [5, 12, 13] визначаються кількісні показники ризику виникнення аварійних ситуацій в ЕЕС статистичним моделюванням її станів з використанням нечітко-імовірнісних моделей відмов електрообладнання. Але в ньому не враховується специфіка електрообладнання і режимів АЕС із системою ВП, що не дає можливості оцінити ризик відмови схем і підсистеми електропостачання ВП станції при подачі живлення від незалежних зовнішніх джерел.

### Постановка задачі

Мета статті – розробка математичних моделей підсистеми електропостачання споживачів ВП АЕС для оцінки ризику відмови при подачі живлення від зовнішніх незалежних джерел в умовах неповних і нечітко заданих параметрів відмов електрообладнання.

### Математична модель для оцінки надійності схем і ризику відмови системи електропостачання ВП АЕС від зовнішніх джерел

Як основний показник надійності схем електропостачання системи ВП АЕС від зовнішніх незалежних джерел використовуємо імовірність її безвідмовної роботи  $P_{\text{ЕП}}^{\text{ВП}}$  на інтервалі часу  $\tau$  (квартал, один рік) [2–4, 12].

Результати оцінки надійності схем електропостачання споживачів ВП АЕС на основі

імовірнісного підходу істотно залежать від достовірності визначення ймовірності відмови кожної одиниці електрообладнання енергосистеми, яка визначається з відповідних моделей відмов [5, 12, 13].

Зазвичай [12–14] інформація, яка необхідна для кількісної та якісної оцінки ризику виникнення аварій у підсистемах ЕЕС при відмовах електрообладнання, є неповною та суттєво невизначеною і містить дані як імовірнісної, так і нечіткої природи, що потребує диференційованого підходу при формуванні структури та ідентифікації параметрів моделей відмов.

Статистичні дані по відмовах електрообладнання різних типів і класів напруги [4, 13] показують, що навіть для однотипного електрообладнання в межах одного класу напруги значення інтенсивностей відмов  $\lambda$  змінюється в широких межах, зокрема для високовольних повітряних вимикачів напругою 330 кВ – у межах  $(0,03-0,2) \text{ рік}^{-1}$ , що пояснюється різним віковим складом обладнання, умовами експлуатації та низкою інших причин. Неточність визначення  $P(t)$  при зміні інтенсивності відмов  $\lambda$  може сягати більше 100 % [13] й істотно залежить від строку експлуатації електрообладнання на момент проведення розрахунку.

За відсутності статистично достеменної інформації для визначення показників надійності схем електричних з'єднань АЕС із системою, на відміну від підходу, запропонованого в [3], найбільш ефективним при формуванні функції розподілу імовірності відмови є застосування експертних оцінок щодо рівня технічного стану (ТС) [12, 13, 15] та інтенсивностей відмов  $\lambda$  конкретних одиниць обладнання на всіх ділянках напрацювання та теорії нечітких множин для побудови моделей відмов об'єкта [6, 12, 16].

На сьогодні електропостачання споживачів ВП АЕС від зовнішньої мережі можливе від двох систем незалежних джерел, одна з яких здійснює подачу живлення безпосередньо на ЗШ 330 кВ, а інша – на ЗШ 750 кВ. Узагальнена розрахункова структурна схема для визначення показників надійності схем живлення системи ВП АЕС 6 кВ від незалежних генеруючих джерел при відмовах власних джерел електропостачання показана на рис. 1 [4]. Ланцюги подачі живлення на шини високої напруги АЕС від зовнішніх незалежних джерел є радіальними схемами, надійність безвідмовної роботи яких залежить від відповідних показників надійності окремих елементів.

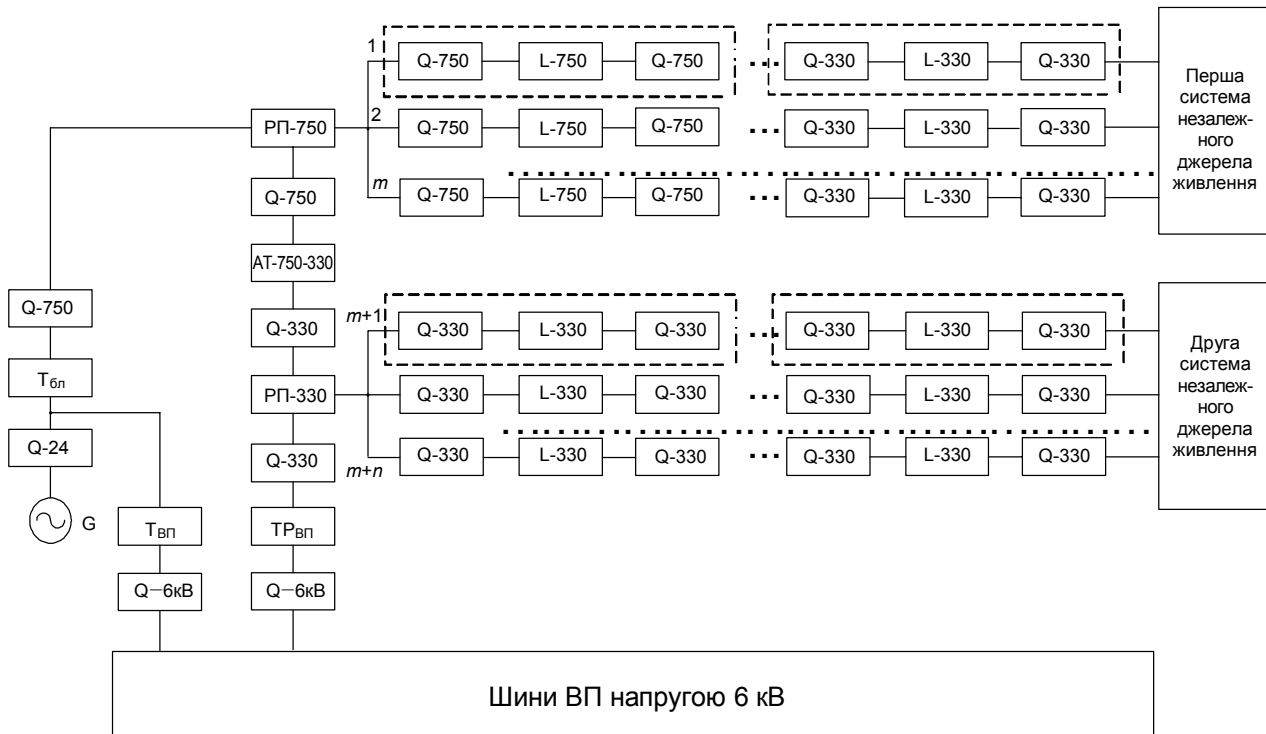


Рис. 1. Узагальнена розрахункова схема для оцінки надійності схеми подачі живлення від зовнішніх джерел: G – синхронний генератор блоку; Т<sub>бл</sub> – блоковий трансформатор; РП-750, РП-330 – розподільчі пристрої високої напруги електростанції; Q – високовольні вимикачі; L – повітряні лінії; (1, m), (m + 1, m + n) – ланцюги подачі живлення на шини 750 кВ і 330 кВ станції від зовнішніх джерел живлення

Імовірності безвідмовної роботи  $P(t)$  і відмов  $F(t)$  одиниць електрообладнання пов'язані з інтенсивністю відмови  $\lambda$  та часом  $t$  і визначаються [13]

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}, F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (1)$$

При цьому згідно з [13] імовірність безвідмовної роботи об'єкта на інтервалі напрацювання  $\Delta t = t_2 - t_1$  за умови, що об'єкт був працездатний на початок інтервалу визначається виразом

$$\tilde{P}(t_2, t_1) = \tilde{P}(t_1 + \Delta t) \times \tilde{P}^{-1}(t_1). \quad (2)$$

В одержаних у [5, 12, 17] моделях відмов електрообладнання енергосистем одного типу і класу напруг на основі даних по відмовах генеральної сукупності одиниць електрообладнання у формі (1) представимо інтенсивність відмови у вигляді нечіткого числа  $\tilde{\lambda}$ .

Для нечіткої інтенсивності відмов  $\tilde{\lambda}(t)$ , яка змінюється в часі (рис. 2), можна записати [4]:

$$\tilde{\lambda}(t) = \{\lambda, \mu_{\tilde{\lambda}(t)}, \lambda \in X\}, X - \text{універсальна}$$

множина,

$\tilde{\lambda}_{\gamma}(t) = \{\lambda | \mu_{\tilde{\lambda}(t)} \geq \gamma, \lambda \in X\}$  – для  $\gamma$ -рівнів представлення,  $\gamma \in [0, 1]$ .

Якщо функція  $\varphi: X \rightarrow U$  є обмежена, неперервна і диференційована, визначена на універсальній множині  $U$  та  $p = \varphi(\lambda)$ , то функція належності для нечіткої надійності  $\tilde{P}$ , яка формується за принципом розширення  $\tilde{P} = \{p, \mu_{\tilde{P}(p)} | p = \varphi(\lambda), p \in U\}$ , визначається [4, 15]

$$\mu_{\tilde{\lambda}(t)} = \sup_{\lambda \in X} \{\mu_{\tilde{\lambda}(t)}(\lambda) | P = \varphi(\lambda)\}, \lambda \in X.$$

При представленні інтенсивності відмов трикутними нечіткими числами (рис. 2) вираз для  $\tilde{\lambda}(t)$  має такий вигляд:

$$\tilde{\lambda}(t) = [m(t) - \alpha(t), m(t), m(t) + \beta(t)],$$

$\tilde{\lambda}(t) = [m(t) - \alpha(t) + \gamma\alpha(t), m(t), m(t) + \beta(t) - \gamma\alpha(t)]$  – на  $\gamma$ -рівні представлення нечіткої множини  $\tilde{\lambda}$ ,  $\gamma \in [0, 1]$ , де  $\alpha(t) \geq 0, \beta(t) \geq 0$  – ліве та праве розширення на інтервалі часу.

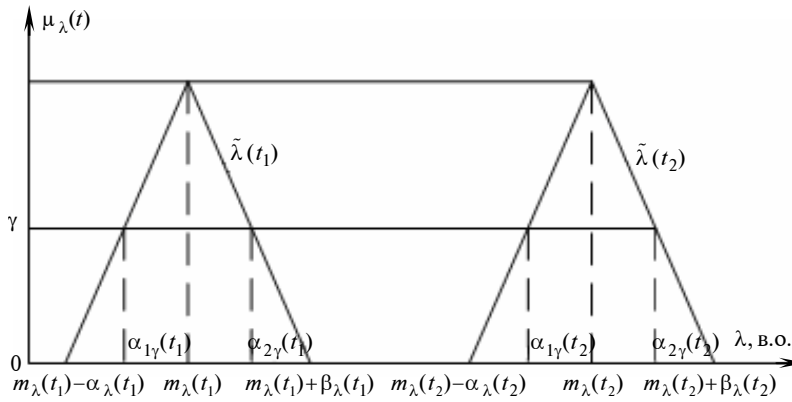


Рис. 2. Змінення інтенсивності відмов електрообладнання в часі при представленні нечіткими числами

З урахуванням того 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, які одержані після взяття обернених функцій з  $\tilde{P}(t)$ , мають вигляд [4, 16, 18]

$$\mu_{\tilde{P}(t)}(P) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\left( \ln(p) + \int_0^t (m(t) + \beta(t)) dt \right)}{\left( \int_0^t \beta(t) dt \right)}, \\ e^{-\int_0^t (m(t) + \beta(t)) dt} \leq P \leq e^{-\int_0^t m(t) dt} \\ \frac{\left( \ln(p) + \int_0^t (m(t) - \alpha(t)) dt \right)}{\left( \int_0^t \alpha(t) dt \right)}, \\ e^{-\int_0^t m(t) dt} \leq P \leq e^{-\int_0^t (m(t) - \alpha(t)) dt} \end{array} \right.$$

Для декомпозированої на окремі блоки моделі надійності схем з послідовним, паралельним та змішаним з'єднанням елементів визначення міри можливості появи вершинної події у випадку об'єднання підмножини-подій логічною "І" умовою здійснюється  $n$ -арним перетворенням можливості їх одночасної появи [4, 18]:

$$\tilde{P}_{Y \otimes} = \prod_{i=1}^n \tilde{P}_i = \tilde{P}_1 \wedge \tilde{P}_2 \wedge \tilde{P}_3 \dots \wedge \tilde{P}_n,$$

де  $\prod_{i=1}^n \tilde{P}_i$  – знак нечіткого перемноження параметрів можливості;  $\tilde{P}_Y, \tilde{P}_i = \text{Poss}(i)$  – міри можливості появи результуючої події  $Y$  і передумов  $i \in n$ , що становлять  $Y$ , які виражені нечіткими числами в апроксимованій L-R-формі відповідно. Значення лівої частини формули розраховується за допомогою таких співвідношень:

$$\tilde{P}_{Y \otimes} = (m_Y, \alpha_Y, \beta_Y) = (m_{P_1}, \alpha_{P_1}, \beta_{P_1}) \otimes$$

$$\otimes (m_{P_2}, \alpha_{P_2}, \beta_{P_2}) \otimes \dots \otimes (m_{P_{n-1}}, \alpha_{P_{n-1}}, \beta_{P_{n-1}}) \otimes \otimes (m_{P_n}, \alpha_{P_n}, \beta_{P_n}) \otimes \dots \otimes (m_{r_{i-1}}, \alpha_{r_{i-1}}, \beta_{r_{i-1}}) \otimes (m_{r_i}, \alpha_{r_i}, \beta_{r_i}),$$

$$m_{r_{i-1}} \cdot \alpha_{r_i} + m_{r_i} \cdot \alpha_{r_{i-1}} - \alpha_{r_i} \cdot \alpha_{r_{i-1}},$$

$$m_{r_{i-1}} \cdot \beta_{r_i} + m_{r_i} \cdot \beta_{r_{i-1}} + \beta_{r_i} \cdot \beta_{r_{i-1}})_{i=n},$$

де  $\otimes$  – операція перемноження нечітких чисел L-R-форми,  $m_{r_i}, \alpha_{r_i}, \beta_{r_i}$  – рекурсивні члени, які розраховуються за формулами:

$$m_{r_0} = m_{P_1}; m_{r_1} = m_{P_1} \cdot m_{P_2}; m_{r_2} = m_{r_1} \cdot m_{P_3}; \dots; m_{r_i} = m_{r_{i-1}} \cdot m_{P_{i+1}}; \alpha_{r_0} = \alpha_{P_1}; \alpha_{r_1} = m_{P_1} \cdot \alpha_{P_2} + m_{P_2} \cdot \alpha_{P_1} - \alpha_{P_1} \cdot \alpha_{P_2}; \alpha_{r_2} = m_{r_1} \cdot \alpha_{P_3} + m_{P_3} \cdot \alpha_{r_1} - \alpha_{P_3} \cdot \alpha_{r_1}; \dots; \alpha_{r_i} = m_{r_{i-1}} \cdot \alpha_{P_{i+1}} + m_{P_{i+1}} \cdot \alpha_{r_{i-1}} - \alpha_{P_{i+1}} \cdot \alpha_{r_{i-1}}; \beta_{r_0} = \beta_{P_1}; \beta_{r_1} = m_{P_1} \cdot \beta_{P_2} + m_{P_2} \cdot \beta_{P_1} + \beta_{P_1} \cdot \beta_{P_2}; \beta_{r_i} = m_{r_{i-1}} \cdot \beta_{P_{i+1}} + m_{P_{i+1}} \cdot \beta_{r_{i-1}} + \beta_{P_{i+1}} \cdot \beta_{r_{i-1}}.$$

У випадках, коли задані нечіткими числами події-передумови з'єднуються логічною умовою "АБО", міра можливості реалізації такої результуючої події визначається [4, 18]

$$\tilde{P}_Y = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{P}_i) = \tilde{P}_1 \vee \tilde{P}_2 \vee \tilde{P}_3 \vee \dots \vee \tilde{P}_n.$$

Формули для визначення міри можливості появи результуючої події  $Y$ , якщо передумови виражені нечіткими числами в L-R-формі, мають такий вигляд:

$$\tilde{P}_{Y \otimes} = (m_Y, \alpha_Y, \beta_Y) = 1 - [m_{r_{i-1}} (1 - m_{P_i})],$$

$$m_{r_{i-1}} \cdot \alpha_{p_i} + (1 - m_{p_i}) \cdot \alpha_{r_{i-1}} - \alpha_{p_i} \cdot \alpha_{r_{i-1}},$$

$$m_{r_{i-1}} \cdot \beta_{p_i} + (1 - m_{p_i}) \cdot \beta_{r_{i-1}} + \beta_{p_i} \cdot \beta_{r_{i-1}}],$$

де  $m_{r_i}, \alpha_{r_i}, \beta_{r_i}$  – рекурсивні члени, які розраховують за формулами:

$$m_{r_0} = m_{p_1}; m_{r_1} = 1 - (1 - m_{p_1})(1 - m_{p_2}); m_{r_2} = 1 - (1 - m_{p_1})(1 - m_{p_3}); m_{r_i} = 1 - (1 - m_{p_{i-1}})(1 - m_{p_{i+1}});$$

$$\alpha_{r_0} = \alpha_{p_1}; \alpha_{r_1} = (1 - m_{p_1}) \alpha_{p_2} + (1 - m_{p_2}) \alpha_{p_1} - \alpha_{p_2} \cdot \alpha_{p_1};$$

$$\alpha_{r_i} = m_{r_{i-1}} \alpha_{p_{i+1}} + (1 - m_{p_{i-1}}) \alpha_{r_{i-1}} - \alpha_{p_{i+1}} \cdot \alpha_{r_{i-1}};$$

$$\beta_{r_0} = \beta_{p_1}; \beta_{r_1} = (1 - m_{p_1}) \beta_{p_2} + (1 - m_{p_2}) \beta_{p_1} + \beta_{p_1} \cdot \beta_{p_2};$$

$$\beta_{r_2} = m_{r_1} \beta_{p_3} + (1 - m_{p_3}) \beta_{r_1} + \beta_{r_1} \cdot \beta_{p_3};$$

$$\beta_{r_i} = m_{r_{i-1}} \beta_{p_{i+1}} + (1 - m_{p_{i+1}}) \beta_{r_{i-1}} + \beta_{p_{i+1}} \cdot \beta_{r_{i-1}}.$$

Використовуючи наведені вище співвідношення, можна виконати наближене інтервальне оцінювання нечіткого прогнозу ймовірності виникнення аварійної відмови окремих елементів схем і ризику відмови підсистеми електропостачання споживачів ВП АЕС від зовнішніх незалежних джерел.

### Результати розрахунку

Для визначення показників надійності схем подачі живлення від незалежних джерел живлення на шини РП високої напруги АЕС розглянемо чотири варіанти схем [4], структура яких, склад, параметри ТС і відмов та строк напрацювання основного силового і комутаційного обладнання (рис. 3). відповідають реально функціонуючим у складі підсистем ЕЕС з АЕС України.

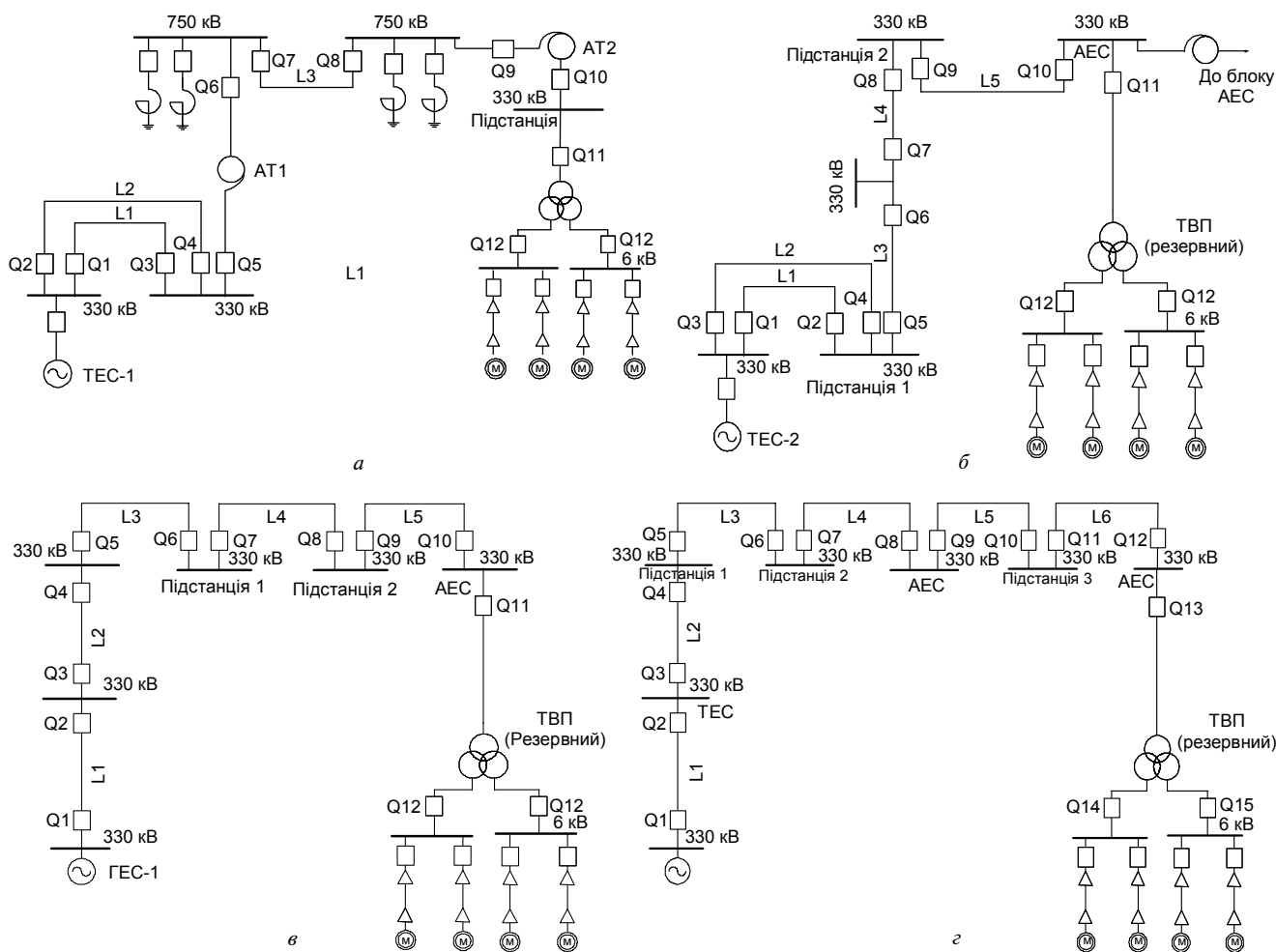


Рис. 3. Розрахункові схеми подачі живлення на шини підключення робочих і резервних трансформаторів ВП АЕС напругою 330 кВ: а – від ТЕС-1; б – від ТЕС-2; в – від ГАЕС; г – від ГЕС

Показники надійності будемо розраховувати на інтервалі спостереження 1 рік. Вихідні дані для розрахунку надійності схем подачі живлення від зовнішніх джерел наведені в табл. 1–4. Базові

функції нечіткої надійності  $\tilde{P}(t)$  окремих елементів розрахункових схем подачі живлення на шини високої напруги ВП АЕС для інтервалу напрацювання від 0 до 50 років представлені на рис. 4.

Таблиця 1. Вихідні дані для розрахунку надійності схем подачі живлення від ТЕС-1

Назва елемента	Позначення елемента на схемі	Строк напрацювання, рік	Параметри функцій нечіткої надійності для моментів часу $t_1$ і $t_2$					
			$P(t_1)$	$\alpha_1$	$\beta_1$	$P(t_2)$	$\alpha_2$	$\beta_2$
Високовольтні вимикачі	Q1, Q2	20	0,470	0,0212	0,0212	0,455	0,0218	0,0218
	Q3, Q4	20	0,470	0,0212	0,0212	0,455	0,0218	0,0218
	Q5, Q6	24	0,410	0,0236	0,0236	0,3806	0,0248	0,0248
	Q7, Q8	26	0,3523	0	0	0,3251	0	0
	Q9, Q10	31	0,229	0	0	0,2083	0	0
Повітряні лінії	L1	20	0,7642	0,0102	0,0103	0,7543	0,0106	0,0107
	L2	20	0,7642	0,0102	0,0103	0,7543	0,0106	0,0107
	L3	26	0,7065	0,0122	0,0124	0,6973	0,0125	0,0127
Силкові транзистори	AT1	24	0,4849	0	0	0,4741	0	0
	AT2	31	0,4131	0	0	0,4036	0	0

Таблиця 2. Вихідні дані для розрахунку надійності схем подачі живлення від ТЕС-2

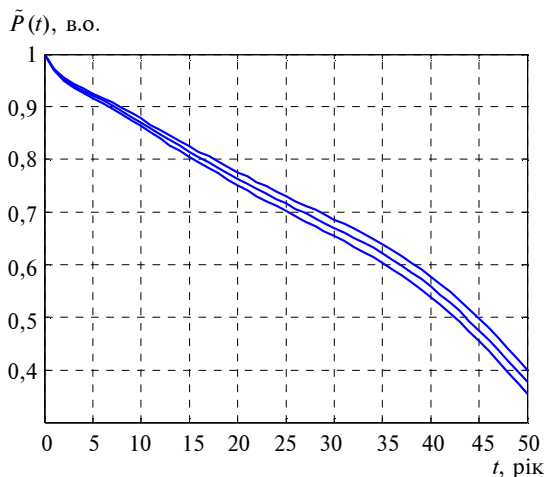
Назва елемента	Позначення елемента на схемі	Строк напрацювання, рік	Параметри функцій нечіткої надійності для моментів часу $t_1$ і $t_2$					
			$P(t_1)$	$\alpha_1$	$\beta_1$	$P(t_2)$	$\alpha_2$	$\beta_2$
Високовольтні вимикачі	Q1, Q2	29	0,2745	0,0254	0,0254	0,2511	0,0262	0,0262
	Q3, Q4	33	0,1889	0,0284	0,0284	0,1708	0,0290	0,0290
	Q5, Q6	35	0,1540	0,0296	0,0296	0,1385	0,0302	0,0302
	Q7, Q8	35	0,1540	0	0	0,1385	0	0
	Q9, Q10	31	0,229	0	0	0,2083	0	0
Повітряні лінії	L1	29	0,6794	0,0143	0,0146	0,6704	0,0146	0,0149
	L2	33	0,6423	0,0155	0,0158	0,6321	0,0157	0,0161
	L3	35	0,6215	0,0160	0,0165	0,6102	0,0164	0,0168
	L4	35	0,6215	0	0	0,6102	0	0
	L5	31	0,6613	0	0	0,6520	0	0

Таблиця 3. Вихідні дані для розрахунку надійності схем подачі живлення від ГАЕС

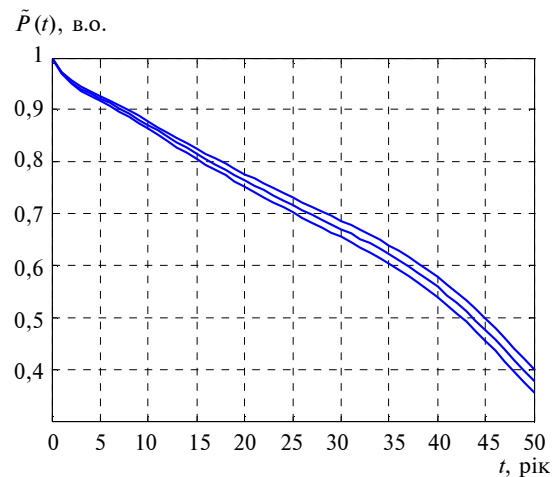
Назва елемента	Позначення елемента на схемі	Строк напрацювання, рік	Параметри функцій нечіткої надійності для моментів часу $t_1$ і $t_2$					
			$P(t_1)$	$\alpha_1$	$\beta_1$	$P(t_2)$	$\alpha_2$	$\beta_2$
Високовольтні вимикачі	Q1, Q2	5	0,7605	0,0096	0,0096	0,7232	0,0111	0,0111
	Q3, Q4	9	0,6350	0,0146	0,0146	0,6200	0,0152	0,0152
	Q5, Q6	10	0,6200	0,0152	0,0152	0,6050	0,0158	0,0158
	Q7, Q8	20	0,4700	0,0212	0,0212	0,4550	0,0218	0,0218
	Q9, Q10	31	0,229	0	0	0,2083	0	0
Повітряні лінії	L1	5	0,9218	0,0037	0,0038	0,9124	0,0042	0,0042
	L2	9	0,8811	0,0056	0,0056	0,8701	0,0060	0,0061
	L3	10	0,8701	0,0060	0,0061	0,8590	0,0065	0,0066
	L4	20	0,7642	0,0102	0,0117	0,7543	0,0106	0,0107
	L5	31	0,6613	0	0	0,6520	0	0

Таблиця 4. Вихідні дані для розрахунку надійності схем подачі живлення від ГЕС

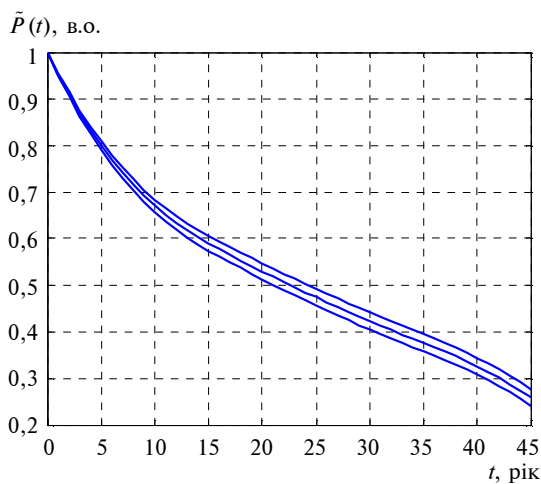
Назва елемента	Позначення елемента на схемі	Строк напрацювання, рік	Параметри функцій нечіткої надійності для моментів часу $t_1$ і $t_2$					
			$P(t_1)$	$\alpha_1$	$\beta_1$	$P(t_2)$	$\alpha_2$	$\beta_2$
Високовольтні вимикачі	Q1, Q2	5	0,7605	0,0084	0,0084	0,7232	0,0097	0,0097
	Q3, Q4	8	0,6500	0,0122	0,0122	0,6350	0,0128	0,0128
	Q5, Q6	15	0,5450	0,0159	0,0159	0,5300	0,0164	0,0164
	Q7, Q8	20	0,4700	0,0186	0,0186	0,4550	0,0191	0,0191
	Q9, Q10	25	0,3806	0	0	0,3523	0	0
	Q11, Q12	31	0,2290	0	0	0,2083	0	0
Повітряні лінії	L1	5	0,9218	0,0037	0,0038	0,9124	0,0042	0,0042
	L2	8	0,8919	0,0051	0,0051	0,8811	0,0056	0,0056
	L3	15	0,8155	0,0083	0,0084	0,8049	0,0087	0,0088
	L4	20	0,7642	0,0102	0,0103	0,7543	0,0106	0,0107
	L5	25	0,7161	0	0	0,7065	0	0
	L6	31	0,6613	0	0	0,6520	0	0



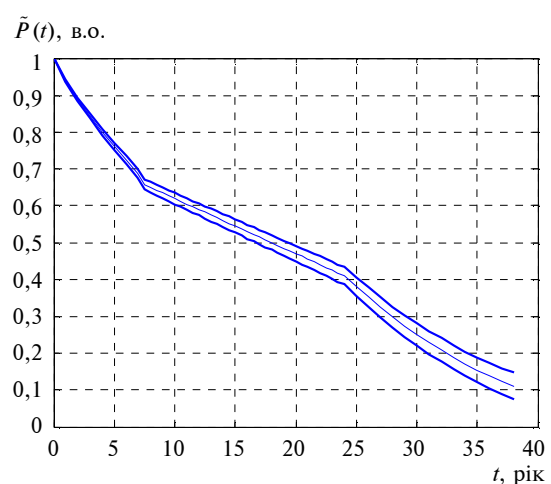
а



б



в



г

Рис. 4. Функції нечіткої надійності окремих елементів схем подачі живлення на шини ВП АЕС: а – лінія електропередачі L1; б – лінія електропередачі L2; в – автотрансформатор АТ1; г – високовольтний вимикач Q5

Таблиця 5. Результати розрахунку імовірності відмови схем і ризику відмови систем подачі живлення на шини високої напруги АЕС від незалежних джерел

Найменування параметра	Схема 1	Схема 2	Схема 3	Схема 4	$R_{СЕП}$
Нечітка імовірність безвідмовної роботи схеми $\tilde{P}$	(0,5691; 0,2094; 0,2444)	(0,4963; 0,3221; 0,4559)	(0,5976; 0,1803; 0,2044)	(0,5024; 0,1409; 0,1593)	(0,072; 0,051; 0,112)
Функція упорядкування нечітких множин $F(A)$	0,578	0,529	0,603	0,5088	—

Результати розрахунку нечіткої надійності окремих схем та ризику відмови системи електропостачання ВП АЕС від незалежних джерел наведено в табл. 5 і показано на рис. 5.

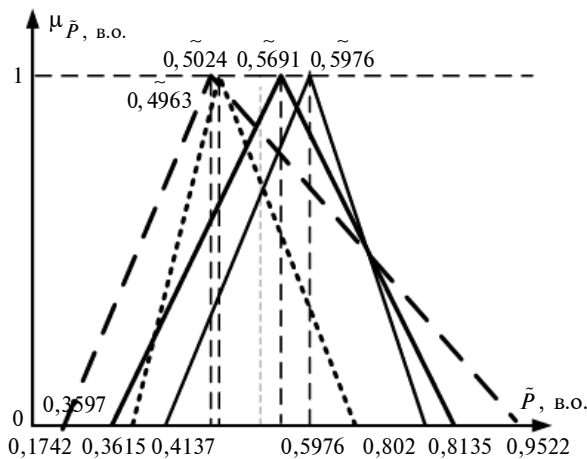


Рис. 5. Функції належності нечіткої надійності схем електропостачання ВП від зовнішніх незалежних джерел

Крім оцінки ризику відмови системи подачі живлення на шини високої напруги АЕС від зовнішніх незалежних джерел [4], важливою задачею для формування заходів щодо забезпечення безпеки функціонування АЕС при знеструмленні ВП є визначення "слабких" за надійністю схем електропостачання.

Для ранжування схем подачі живлення за надійністю використовуємо метод функцій упорядкування нечітких підмножин одиничного інтервалу I. Функція упорядкування  $F^P(A_\alpha^P)$  визначається таким чином [15]:

$$F^P(A_\alpha^P) = \int_0^{\alpha_{\max}} M^P(A_\alpha^P),$$

де  $A_\alpha^P$  – нечітка підмножина одиничного інтервалу з максимальним ступенем належності  $\alpha_{\max} = 1$ ;  $M^P(A_\alpha^P)$  – середня величина елементів підмножини  $A_\alpha^P$  одиничного інтервалу і на  $\alpha$ -рівні.

Для нечітких множин надійності розглядуваних схем (див. рис. 5) функції належності визначаються так:

$$\mu_{0,5691} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } P \leq 0,3597, \\ 4,775 \cdot P - 1,717, & \text{якщо } 0,3597 \leq P \leq 0,5691, \\ -4,092 \cdot P + 3,329, & \text{якщо } 0,5691 \leq P \leq 0,8135, \end{cases}$$

$$\mu_{0,4963} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } P \leq 0,1742, \\ 3,105 \cdot P - 1,541, & \text{якщо } 0,1742 \leq P \leq 0,4963, \\ -2,193 \cdot P + 2,089, & \text{якщо } 0,4963 \leq P \leq 0,9522, \end{cases}$$

$$\mu_{0,5976} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } P \leq 0,5173, \\ 5,546 \cdot P - 2,315, & \text{якщо } 0,4173 \leq P \leq 0,5976, \\ -4,892 \cdot P + 3,92, & \text{якщо } 0,5976 \leq P \leq 0,802, \end{cases}$$

$$\mu_{0,5024} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } P \leq 0,3615, \\ 7,097 \cdot P - 2,565, & \text{якщо } 0,3615 \leq P \leq 0,5024, \\ -6,227 \cdot P + 4,154, & \text{якщо } 0,5024 \leq P \leq 0,6617. \end{cases}$$

$\alpha$ -рівневі множини  $A_\alpha$ , сформовані з лівих і правих форм обернених функцій належності нечітких множин надійності схем, та середні величини елементів  $M^P(A_\alpha^P)$  підмножин  $A_\alpha^P$  одиничного інтервалу I на  $\alpha$ -рівні визначаються так:

$$A_{\alpha,0,5691} = (0,3597 + 0,2094 \cdot \alpha; 0,8135 - \alpha \cdot 0,2444);$$

$$A_{\alpha,0,4963} = (0,1742 + 0,3221 \cdot \alpha; 0,9522 - \alpha \cdot 0,4559);$$



$$A\alpha_{0,5976} = (0,4173 + 0,1803 \cdot \alpha; 0,802 - \alpha \cdot 0,2044);$$

$$A\alpha_{0,5024} = (0,3615 + 0,1409 \cdot \alpha; 0,6617 - \alpha \cdot 0,1593);$$

$$M\alpha_{0,5691} = -0,0175 \cdot \alpha + 0,5866;$$

$$M\alpha_{0,4963} = -0,0669 \cdot \alpha + 0,5632;$$

$$M\alpha_{0,5976} = -0,01205 \cdot \alpha + 0,60965;$$

$$M\alpha_{0,5024} = -0,0092 \cdot \alpha + 0,5116.$$

Результати розрахунку нечіткої надійності безвідмовної роботи схем подачі живлення від незалежних зовнішніх джерел і відповідні функції упорядкування та ризик відмови підсистеми електропостачання  $\tilde{R}_{\text{СЕП}}$  від зовнішніх незалежних джерел наведено в табл. 5.

За результатами розрахунків ланцюг подачі живлення на шини високої напруги АЕС від ТЕС-1 є найбільш надійним, при цьому модальне значення нечіткої величини ризику відмови всієї системи електропостачання, що містить чотири незалежних взаємно резервованих ланцюги подачі живлення, становить  $\tilde{R}_{\text{СЕП}} = 0,072$ .

## Висновки

Підвищення аварійності в сучасних ЕЕС, що містять АЕС, і необхідність забезпечення достатнього рівня безпеки функціонування станції потребують постійного моніторингу за роботою підсистем ЕЕС і АЕС та визначення кількісних показників ризику відмови системи електропостачання ВП при збуреннях в енергосистемі.

## Список літератури

1. IAEA Nuclear Energy Series, № N6T38 Electric Grid Reliability and Interface with Nuclear Power Plants, 2012.
2. Ciapessoni E., Cirio D., Gagleoti E.A. Probabilistic approach for operational risk assessment of power systems // CIGRE. – 2008. – P. 4–114.
3. Скопинцев 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.
4. Бардик Є.І. Моделі оцінки надійності схем електропостачання власних потреб АЕС від незалежних зовнішніх джерел при нечітко заданих параметрах відмов електрообладнання // Праці Ін-ту електродинаміки НАНУ. – 2014. – Вип. 37. – С. 34–38.

В умовах об'єктивно існуючої неповноти і невизначеності статистичної інформації щодо відмов електрообладнання, зокрема інтенсивностей відмов  $\lambda$ , визначення імовірності відмови одиниць основного силового і комутаційного обладнання з достатньою для практики точністю може бути виконане на основі нечітко-імовірнісних моделей відмов.

На базі одержаних функцій розподілу імовірності відмов основного силового і комутаційного електрообладнання енергосистем запропоновано нечіткі моделі відмов електрообладнання, схем і системи електропостачання ВП АЕС від зовнішніх незалежних джерел живлення та відповідне програмне забезпечення. З використанням отриманих нечітких моделей відмов електрообладнання, адаптованих до реальних умов експлуатації з допомогою програмного комплексу RISK-NPP для чотирьох варіантів схем подачі живлення, структура, склад, параметри ТС і відмов та строк напрацювання основного і комутаційного обладнання відповідають реально функціонуючим у складі ЕЕС з АЕС України. Визначено показники надійності схем подачі живлення, ранжування їх за надійністю та виконано оцінювання ризику відмови системи електропостачання від зовнішніх незалежних джерел.

Перспективним розвитком питань, які розглянуто в матеріалах статті, є розробка математичного і програмного забезпечення оцінки ризику знеструмлення ВП АЕС унаслідок порушення динамічної стійкості в енергосистемі та інтеграція представлених у публікації моделей і їх програмної реалізації до єдиного комплексу "RISK EPS-NPP" для оцінки структурної і режимної надійності підсистеми ЕЕС з АЕС та ВП станції.

5. Бардик Є.І. Модування електроенергетичної системи для оцінки ризику виникнення аварій при відмовах електрообладнання // Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Сер. Електротехніка та енергетика. – 2013. – № 1(14). – С. 15–21.
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. Костерев Н.В., Бардик Е.И. Моделирование динамики АЭС в аварийных режимах снижения напряжения и частоты в системе собственных нужд // Техн. электродинамика. Тем. вып. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2004. – Ч. 7. – С. 31–37.
8. Saslvaderi L., Bilinton R. A comparison between two fundamentally different approaches to composite system reliability // IEEE Trans. Pas. – 1985. – 104, № 12. – P. 3486–3492.
9. Composite power system reliability analysis application to the New Brunswick power Corporation System: The draft report of the CIGRE Symposium on Electric Power System Reliability, Sept., 16–18, 1991, Montreal, Canada.
10. Bertoldi O., Scalcino S., Salvaderi L. Adequacy avalluation:an application of ENEL's SECRET program to new Brunswick Power System // CIGRE Simposium on Electric Power System Reliability, Montreal, 1991, WG38.03/01.
11. Чукреев Ю.Я. Модели обеспечения надежности элетроэнергетических систем. – Сыктывкар: АН СССР Коми филиал, 1995. – 173 с.
12. Бардик Є.І., Костерев М.В., Литвинов В.В. Оцінка імовірності відмови електрообладнання при керуванні режимами електричної системи // Збірник праць V Міжнар. науково-техн. конф. "Керування режимами роботи об'єктів електричних та електромеханічних систем – 2011". – Святогорськ, 2011. – С. 199–204.
13. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования. – Иваново: ИГЭУ, 2005. – 224 с.
14. Бардик Є.І., Костерев М.В., Литвинов В.В. Параметрична ідентифікація нечітких моделей електрообладнання електросистем // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2011. – № 1. – С. 78–89.
15. Cai K.-Y., Wen C.-Y., Zhang, M.-L. Fuzzy variables as a basic for a theory of fuzzy reliability in the possibility cjntext // Fuzzy Set and Systems. – 1991. – 42. – P. 145–172.
16. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решений на основе нечетких моделей: примеры использования. – Рига: Зинатне, 1990. – 184 с.
17. Бардик Є.І., Снотар О.С. Ідентифікація параметрів функцій розподілу імовірності відмов електрообладнання для оцінки експлуатаційного ризику електроенергетичних систем // Матеріали XIII Міжнар. науково-практ. конф. "Відновлювана енергетика XXI століття". – Миколаївка, 2012. – С. 102–105.
18. Белов П.Г. Теоретические основы системной инженерии безопасности. – М.: ГН ТП "Безопасность", МИГ СТС, 1996. – 424 с.

## References

1. IAEA Nuclear Energy Series, № N6T38 Electric Greed Realiability and Interface with nuclear Power Plants, 2012.
2. E. Ciapessoni *et al.*, "Probabilistic approach for operational risk assessment of power systems", *CIGRE*, pp. 4–114, 2008.
3. V.A. Skopyntsev, "Assessment of reliability of electrical connection of NPP with power grid for electricity supply of auxiliary transformer from external sources", in *Jelektrojenergetika Rossii: Sovremennoe Sostojanie, Problemy i Perspektivy*, M.Sh. Mysrykhanova *et al.*, Eds. Moscow, Russia: Energoatomizdat, 2007, 176 p. (in Russian).
4. Іє.І. Бардык, "Reliability evaluation models of auxiliary supply system of nuclear power plant from independent sources with fuzzy defined parameters of electrical equipment failures", *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NANU*, vol. 37, pp. 34–38, 2014 (in Ukrainian).
5. Іє.І. Бардык, "Modeling of electric power system for risk assessment of accidents occurrence during the failure of electrical equipment", *Naukovi Pratsi Donets'koho Nats. Tekhn. Univesytetu. Ser. Elektrotehnika ta Enerhetyka*, no. 1(14), pp. 15–21, 2013 (in Ukrainian).
6. M.V. Kosteriev and Іє.І. Бардык, *Questions of Construction Technical Evaluation of Objects of Fuzzy Models of Electrical Systems*. Kyiv, Ukraine: NTUU KPI, 2010, p. 131 (in Ukrainian).
7. M.V. Kosteriev and Іє.І. Бардык. "Dynamic modeling of NPP in accidental condition of voltage and frequency reduction in auxiliary system", *Tekhn. Elektrodynamika. Tem. vyp. "Problemy Suchasnoyi Elektrotehniky"*, part 7, pp. 31–37, 2004 (in Russian).
8. L. Saslvaderi and R. Bilinton, "A comparison between two fundamentally different approaches to composite system reliability", *IEEE Trans. Pas.*, vol. 104, no. 12, pp. 3486–3492, 1985.

9. *Composite Power System Reliability Analysis Application to the New Brunswick Power Corporation System*, The draft report of the CIGRE Symposium on Electric Power System Reliability, Montreal, Canada, Sept. 16–18, 1991.
10. O. Bertoldi *et al.*, “Adequacy avalluation: an application of ENEL’s SICRET program to new Brunswick Power System”, in *CIGRE Simposium on Electric Power System Reliability*, WG38.03/01, Montreal, Canada, 1991.
11. Іу.А. Chukreiev, *Meshed Power System Reliability Estimation Models and Approaches*. Syktyvkar: AS USSR Komi, 1995, 173 p. (in Russian).
12. Іе.І. Bardyk and M.V. Kosteriev, “Evaluation of probability of failure of electrical equipment in driving modes of electrical system”, in *Proc. V Int. Sci. Conf. Managing Objects Modes of Electrical and Electromechanical Systems – 2011*, Svyatogirsk, Ukraine, 2011, pp. 199–204 (in Ukrainian).
13. A.N. Nazarychev and D.A. Andreiev, *Methods and Mathematical Models of Comprehensive Evaluation of Electrical Equipment*. Ivanovo, Russia: IGEU, 2005, 224 p. (in Russian).
14. Іе.І. Bardyk and M.V. Kosteriev, “Parametric identification of fuzzy models of electrical equipment of electrical systems”, *Enerhetyka: Ekonomika, Tekhnolohiyi, Ekolohiya*, no. 1, pp. 78–89, 2011 (in Ukrainian).
15. K.-Y Cai, *et al.*, “Fuzzy variables as a basic for a theory of fuzzy reliability in the possibility context”, *Fuzzy Set and Systems*, vol. 42, pp. 145–172, 1991.
16. A.N. Borysov *et al.*, *Decision-Making Based on Fuzzy Models: Use Examples*. Riga, Latvia: Zinatne, 1990, 184 p.
17. Іе.І. Bardyk and O.S. Spotar, “Identification of failure probability function parameters of power equipment for power systems maintenance risk assessment”, in *Proc. XIII Sci. Pract. Conf. Renewable Energy of XXI Century*, Mykolaivka, Autonomous Republic of Crimea, 2012, pp. 102–105 (in Ukrainian).
18. P.H. Bielov, *Theoretical Framework of Systems Engineering of Security*. Moscow, Russia: GN TP “Bezopasnost”, MIG STS, 1996, 424 p.

Бардик Є.І.

#### МОДЕЛЮВАННЯ Й ОЦІНКА РИЗИКУ ВІДМОВИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ВІД ЗОВНІШНІХ НЕЗАЛЕЖНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ

**Проблематика.** В умовах об’єктивно існуючого старіння електрообладнання, погіршення кліматичних умов, напруженого режиму роботи оперативного персоналу сучасних електроенергетичних систем (ЕЕС) з атомними електростанціями (АЕС) загострюється проблема забезпечення надійності та безпеки функціонування АЕС при виникненні аварійних ситуацій в енергосистемі, що потребує комплексного аналізу ризику експлуатації підсистем ЕЕС з АЕС при відмовах електрообладнання.

**Мета дослідження.** Розробка математичного і програмного забезпечення оцінки надійності схем і ризику відмови системи електропостачання власних потреб (ВП) АЕС від зовнішніх незалежних джерел живлення в умовах втрати внутрішнього електропостачання ВП для забезпечення режиму розхолодження енергоблоку та пуску “з нуля”.

**Методика реалізації.** В умовах суттєвої неповноти і невизначеності статистичної інформації по відмовах електрообладнання зовнішньої електричної мережі для оцінки ризику відмови системи електропостачання ВП АЕС від зовнішніх незалежних джерел запропоновано метод формування функцій розподілу відмов електрообладнання. Цей метод ґрунтується на використанні статистичних даних по відмовах генеральної сукупності одиниць електрообладнання певного типу і класу напруги та експертних оцінках щодо інтенсивності відмови конкретних одиниць обладнання.

**Результати дослідження.** Розроблено гібридні нечітко імовірнісні моделі відмов основного силового і комутаційного обладнання енергосистем і власних потреб та оцінки ризику відмови системи електропостачання ВП від зовнішніх джерел. Для чотирьох варіантів схем подачі живлення від незалежних зовнішніх джерел живлення на шини розподільчого пристрою високої напруги АЕС виконано оцінювання імовірності безвідмовної роботи і нечітке ранжування за надійністю; виконано оцінювання ризику відмови системи зовнішнього електропостачання від віддалених електростанцій та підстанцій.

**Висновки.** Для оцінки надійності схем і ризику відмови електрообладнання та системи електропостачання ВП від зовнішніх джерел розроблено нечіткі математичні моделі і виконано оцінювання ризику відмови чотирьох схем подачі живлення на шини високої напруги АЕС.

**Ключові слова:** атомна електростанція; надійність; ризик; відмова; нечіткі множини; імовірність; електропостачання.

Бардик Е.И.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА РИСКА ОТКАЗА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ОТ ВНЕШНИХ НЕЗАВИСИМЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

**Проблематика.** В условиях объективно существующего старения электрооборудования, ухудшения климатических условий, напряженного режима работы оперативного персонала современных электроэнергетических систем (ЭЭС) с атомными электростанциями (АЭС) обостряется проблема обеспечения надежности и безопасности функционирования АЭС при возникновении аварийных ситуаций в энергосистеме, что требует проведения комплексного анализа риска эксплуатации подсистем ЭЭС с АЭС при отказе электрооборудования.

**Цель исследования.** Разработка математического и программного обеспечения, оценки надежности схем и риска отказа системы электроснабжения собственных нужд (СН) АЭС от внешних независимых источников питания в условиях потери внутреннего электроснабжения СН для обеспечения режима расхоложивания и пуска блока “с нуля”.

**Методика реализации.** В условиях существенной неполноты и неопределенности статистической информации по отказам электрооборудования внешней электрической сети для оценки риска отказа системы электроснабжения СН АЭС от внешних независимых источников предложен метод формирования функций распределения отказов электрооборудования. Этот метод основывается на использовании статистических данных по отказам генеральной совокупности единиц электрооборудования определенного типа и класса напряжения и экспертных оценках интенсивности отказа конкретных единиц оборудования.

**Результаты исследования.** Разработаны гибридные нечетко-вероятностные модели отказов основного силового и коммутационного оборудования энергосистем и собственных нужд АЭС и оценки риска отказа систем электроснабжения СН от внешних источников. Для четырех вариантов схем подачи питания на шины распределительного устройства высокого напряжения АЭС проведены оценивание вероятности безотказной работы и нечеткое ранжирование по надежности; выполнена оценка риска отказа системы внешнего электроснабжения от удаленных электростанций и подстанций.

**Выводы.** Для оценки надежности схем и риска отказа электрооборудования и системы электроснабжения СН от удаленных источников разработаны нечеткие математические модели и выполнена оценка риска отказа четырех схем подачи питания на шины высокого напряжения АЭС.

**Ключевые слова:** атомная электростанция; надежность; риск; отказ; нечеткие множества; вероятность; электроснабжение.

Рекомендована Радою  
факультету електроенерготехніки  
та автоматики НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції  
26 січня 2015 року