РОМАНЧУК К.Г.

СТЕФАНИШИН Д.В.

УДК 519.7:626/627.8

РОМАНЧУК К.Г., аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору (ІТГІП) НАН України, м. Київ,
СТЕФАНИШИН Д.В., докт. техн. наук, пров. н. с. ІТГІП НАН України, м. Київ, проф. каф. гідротехнічного будівництва НУВГП, м. Рівне

ІМОВІРНІСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЦЕНАРІЇВ ДВОХ НЕТИПОВИХ АВАРІЙ НА ГІДРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТАХ

Виконано імовірнісне моделювання аварії, що відбулася на ГАЕС Таум Саук в США, штат Міссурі, в 2005 р., та аварії на Саяно-Шушенській ГЕС в 2009 р. в Росії, перебіг яких супроводжувався відмовами автоматичних засобів контролю та регулювання, оснащених сучасною комп'ютерною технікою. Встановлено критичне значення ймовірності відмови систем автоматичного регулювання, при збільшенні якого вплив цих засобів на ймовірність розвитку подібних аварій починає стрімко зростати.

За останнє десятиліття на гідроенергетичних об'єктах сталися дві серйозні аварії, які можна назвати нетиповими, оскільки раніше в світовій практиці подібні аварії ще не траплялися. Перебіг цих аварій супроводжувався відмовами автоматичних засобів контролю та регулювання, оснащених сучасною комп'ютерною технікою.

Одна з аварій відбулася 14 грудня 2005 р. на ГАЕС Таум Саук (Taum Sauk, штат Міссурі, США). Було встановлено, що причиною руйнування дамби огородження верхового басейну ГАЕС було його переповнення та перелив води через гребінь дамби внаслідок збою в комп'ютерній програмі системи автоматичного регулювання рівня води в басейні [1, 2].

Інша аварія сталася 17 серпня 2009 року на Саяно-Шушенській ГЕС (Росія, Хакасія) в результаті руйнування одного з гідроагрегатів. Аварія розвинулася до катастрофічних масштабів внаслідок відмови автоматики, що не спрацювала в режимі перекриття напірних трактів аварійно-ремонтними затворами. Під час аварії загинуло 75 працівників ГЕС [3, 4].

В обох випадках аварії носили складний системний характер, з залученням в механізми виникнення й розвитку аварій автоматичних засобів забезпечення безпеки об'єктів.

ГАЕС Таум Саук розташована в гірському районі штату Міссурі на відстані 140 км на південь від м. Сент Луїс поблизу містечка Лестерміль. ГАЕС Таум Саук, яка знаходиться в підпорядкуванні електричної компанії AmerenUE, була запроектована з метою покриття щоденних пікових навантажень. Її будівництво велося з 1960 по 1963 р. Спочатку на станції було встановлено два оборотні гідроагрегати потужністю 175 МВт кожний. Перепад висот розташування верхового и низового басейнів ГАЕС Таум Саук складає біля 240 м. Басейни сполучаються тунелем, протяжністю 2,1 км. Після модернізації, проведеної в 1999 р., на станції були встановлені оборотні гідроагрегати потужністю 225 МВт кожний. На момент аварії загальна потужність ГАЕС складала 450 МВт. Загальний об'єм верхового басейну ГАЕС при нормальному підпірному рівні (НПР) досягав 5,4 млн. м^3.

З моменту введення ГАЕС в експлуатацію на верховому басейні не фіксувалися порушення, які б загрожували стійкості чи фільтраційній міцності дамби. Фільтраційні витрати з верхового басейну були незначними, а після укладки в 2004 р. геотекстильних матеріалів, в якості додаткового водоутримуючого екрана, були практично зліквідовані.

В грудні 2005 р. внаслідок збою комп'ютерної програми в системі автоматичного регулювання рівня води відбулося переповнення верхового басейну та переливання води через дамбу на ділянці з її північно-західної сторони (Рис. 1). Через утворений в тілі дамби проран протягом 12 хвилин з басейну вилилося понад 5 млн. м^3 води. Висота гребеня хвилі прориву, яка пронеслася у напрямку р. Блек Рівер, досягала 7 м.

Саяно-Шушенська ГЕС, яка розташована в верхній течії р. Єнісей в Хакасії, має встановлену потужність 6400 МВт. Це найпотужніша електростанція Росії і шоста за потужністю ГЕС у світі. До аварії 2009 р. виробляла майже 15 % електроенергії, яку виробляють всі ГЕС ВАТ "РусГідро", і до 2 % загального об'єму електроенергії, що виробляють всі електростанції Росії. Напір на ГЕС утворює унікальна арково-гравітаційна гребля максимальною висотою 245 м, довжиною по гребеню 1066 м, шириною по основі 110 м і по гребеню 25 м [5, 6].

Перший агрегат Саяно-Шушенської ГЕС був введений в роботу в 1977 р., останній — десятий — в 1984 р.

До аварії 2009 р. Саяно-Шушенської ГЕС мали місце серйозні аварії з пошкодженням греблі

а *б*

Рис. 1. **Верховий басейн ГАЕС Таум Саук (США) до (*а*) та після аварії (*б*) 2005 р.**

та устаткування.

Так, наприклад в 1979 р. внаслідок неконтрольованого пропуску води через недобудовані тимчасові водоскиди другого ярусу була пошкоджена гребля, затоплена будівля ГЕС разом з працюючим першим агрегатом. В 1985 р. при скиді потужного паводка було зруйновано до 80 % площі дна водобійного колодязя.

Серйозні проблеми на ГЕС створювала також сильна фільтрація через тріщини в тілі греблі, що збільшувалася в часі. Посилена фільтрація була зліквідована за допомогою французької фірми "Soletanche Bachy" на основі нагнітання в тріщини спеціальних смол.

В своїй книзі В.І.Бризгалов, бувший генеральний директор Саяно-Шушенської ГЕС, підкреслював, що не всі наукові й проектні обґрунтування, технологія будівництва греблі, виготовлення та монтаж агрегатів виявилися адекватними параметрам греблі і станції [6].

На момент аварії, що сталася 17 серпня 2009 р., на Саяно-Шушенській ГЕС працювали 9 з 10 агрегатів. Вранці, в 8:13 за місцевим часом, відбулося катастрофічне руйнування агрегату № 2 зі зривом турбінної кришки й надходженням через шахту гідроагрегату під великим напором значних об'ємів води. Руйнувань і пошкоджень зазнали дев'ять з десяти гідроагрегатів, були повністю зруйновані стіни та перекриття машинного залу в районі розташування агрегатів № 2, 3, 4, загинуло 75 працівників ГЕС (Рис. 2).

Відбулося повне скидання навантаження ГЕС, пропали оперативний зв'язок, електроосвітлення, системи автоматики й сигналізації. Автоматичні системи, що зупиняють агрегати, спрацювали лише на агрегаті № 5. Затвори довелося закривати вручну, на що знадобилося біля однієї години. Крім того, електропостачання козлового крана на гребені греблі від дизель-генератора для підйому затворів на водоскидах було організовано лише через три години після перекриття затворів турбінних водоводів (11:32). Існувала загроза аварії і на греблі.

Незважаючи на те, що безпосередніми причинами аварії на агрегаті № 2 були визнані надлишкові динамічні навантаження й вібрації, пошкодження й руйнування вузлів кріплення агрегату та турбінної кришки, що, в результаті, й призвело до зриву кришки й розгерметизації напірного водоводу агрегату № 2, можна стверджувати, що нас-

а *б*

Рис. 2. **Машинний зал Саяно-Шушенської ГЕС до (*а*) та після аварії (*б*) 2009 р.**

лідки аварії були б значно меншими за умови спрацювання систем автоматики по перекриттю напрямних апаратів уцілілих агрегатів та напірних водоводів аварійно-ремонтними затворами.

З метою встановлення ролі автоматичних засобів контролю та регулювання в перебігу аварій на ГАЕС Таум Саук (2005 р.) та на Саяно-Шушенській ГЕС (2009 р.) було здійснено імовірнісне моделювання сценаріїв розвитку аварій, отримано залежності для оцінки їх ймовірностей з врахуванням відмов систем автоматики та здійснено розрахунки ймовірностей аварій при різних значеннях ймовірностей відмов автоматичних пристроїв.

При моделюванні та оцінці апостеріорної ймовірності аварії на ГАЕС Таум Саук розглядалася система $\mathbf{S}_{1,a} = \{s_d, s_a\}$ у складі огороджувальної дамби верхового басейну (підсистема s_d) та системи автоматичного регулювання рівня (підсистема s_a).

Нехай $P(s_d)$ — ймовірність руйнування дамби за незалежних від роботи автоматики причин (ймовірність незалежної відмови підсистеми s_d); $P(s_a)$ — ймовірність відмови системи автоматичного регулювання рівня (ймовірність відмови підсистеми s_a).

Аварія на верховому басейні ГАЕС Таум Саук могла б і не відбутися, при відмові автоматики, якби було передбачено облаштування аварійного водозливу на випадок переповнення басейну вище нормальнопідпертого рівня (НПР) з загрозою переливання води через гребінь дамби.

Переповнення басейну, як показали розрахунки мало тривати близько 72 хвилин. Відсутність аварійного водозливу моделювалася умовою θ, за якої ймовірність руйнування дамби (у випадку відмови системи автоматичного регулювання рівня) становитиме $P(s_{d,\theta})$.

Позначимо через $\bar{\theta}$ умову безвідмовної роботи автоматики в системі $\mathbf{S}_{1,a} = \{s_d, s_a\}$; $(\mathbf{S}_{1,a}, \bar{\theta})$ — аварійну подію в системі $\mathbf{S}_{1,a}$ за умови $\bar{\theta}$, $(\mathbf{S}_{1,a}, \theta)$ — аварійну подію в системі $\mathbf{S}_{1,a}$ за умови θ. Оскільки умови θ, $\bar{\theta}$, за визначенням, формують повну групу подій, то події $(\mathbf{S}_{1,a}, \bar{\theta})$, $(\mathbf{S}_{1,a}, \theta)$ — несумісні, і повна ймовірність аварії в системі $\mathbf{S}_{1,a}$ буде:

$$P(\mathbf{S}_{1,a}) = P(\mathbf{S}_{1,a}, \bar{\theta}) + P(\mathbf{S}_{1,a}, \theta), \qquad (1)$$

де $P(\mathbf{S}_{1,a}, \bar{\theta})$, $P(\mathbf{S}_{1,a}, \theta)$ — ймовірності подій $(\mathbf{S}_{1,a}, \bar{\theta})$, $P(\mathbf{S}_{1,a}, \theta)$ в системі $\mathbf{S}_{1,a}$, відповідно.

Ймовірність події $(\mathbf{S}_{1,a}, \bar{\theta})$, можна визначити через ймовірності $P(s_d)$ та $P(s_a)$:

$$P(\mathbf{S}_{1,a}, \bar{\theta}) = P(s_d)\,(1 - P(s_a)). \qquad (2)$$

У випадку події $(\mathbf{S}_{1,a}, \theta)$ має відбутися відмова автоматики (s_a) і має відмовити підсистема s_d. Нехай $P(s_a)^*$ — ймовірність того, що відмова підсистеми s_a відбудеться раніше, ніж відмовить підсистема s_d. Тоді [7] повна ймовірність

$$P(\mathbf{S}_{1,a}, \theta) = 2\,P(s_a)^* P(s_{d,\theta}). \qquad (3)$$

Нехай $P(s_a \cup s_d)$ — ймовірність того, що відмовить підсистема s_a або підсистема s_d; $P(s_a | s_a \cup s_d)$ — умовна ймовірність відмови автоматики (s_a) в ситуації $s_a \cup s_d$. Маємо

$$P(s_a)^* = P(s_a | s_a \cup s_d)\,P(s_a \cup s_d)\,. \qquad (4)$$

Згідно з теоремою Байєса, для повної групи подій,

$$P(s_a | s_a \cup s_d) = \frac{P(s_a \cup s_d | s_a) P(s_a)}{P(s_a \cup s_d)}. \qquad (5)$$

де $P(s_a \cup s_d | s_a)$ — умовна ймовірність події $(s_a \cup s_d)$ при відмові автоматики (s_a), якщо дотримуються умови повної групи. З врахуванням нормування [8] маємо:

$$P(s_a \cup s_d | s_a) = \frac{P(s_a)}{P(s_a) + P(s_{d,\theta})}, \qquad (6)$$

$$P(s_a)^* = \frac{2P(s_a)^2}{P(s_a) + P(s_{d,\theta})},$$

$$P(\mathbf{S}_{1,a}, \theta)^* = \frac{2P(s_a)^2 P(s_{d,\theta})}{P(s_a) + P(s_{d,\theta})}. \qquad (7)$$

Звідки повна ймовірність виникнення аварії в системі $\mathbf{S}_{1,a}$ буде:

$$P(\mathbf{S}_{1,a}) = P(s_d)\,(1 - P(s_a)) + \frac{2P(s_a)^2 P(s_{d,\theta})}{P(s_a) + P(s_{d,\theta})}. \qquad (8)$$

На Рис. 3 наведені графіки залежності ймовірності виникнення аварії в системі $\mathbf{S}_{1,a}$ від ймовірності відмови підсистеми s_a (системи автоматичного регулювання рівня води в верховому басейні ГАЕС) при різних значеннях ймовірностей відмов підсистеми s_d (ймовірностей руйнування дамби огородження басейну за незалежних від роботи автоматики причин):

1— $P(s_d) = 5 \cdot 10^{-3}$, рік$^{-1}$; *2* — $P(s_d) = 10^{-3}$, рік$^{-1}$; *3* — $P(s_d) = 5 \cdot 10^{-4}$, рік$^{-1}$; *4* — $P(s_d) = 10^{-4}$, рік$^{-1}$; *5* — $P(s_d) = 5 \cdot 10^{-5}$, рік$^{-1}$. Ймовірність $P(s_{d,\theta})$ руйнування дамби у випадку відмови системи автоматичного регулювання рівня s_a приймалася рівною одиниці.

Можна зауважити, що у випадку, коли ймовірність відмови системи автоматичного регулюван-

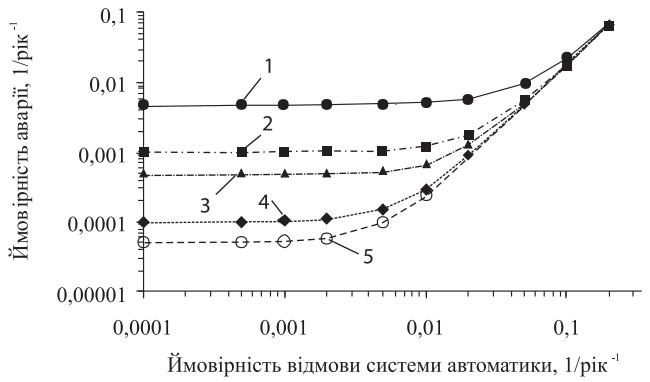

Рис. 3. **Графіки залежності ймовірності виникнення аварії в системі $\mathbf{S}_{1,a}$ від ймовірності відмови підсистеми s_a**

ня рівня води в верховому басейні ГАЕС починає перевищувати величину близьку до 10^{-2}, рік$^{-1}$, ймовірність аварії в системі $\mathbf{S}_{1,a}$ стрімко зростає вже при незначних змінах ймовірності відмови автоматики в сторону збільшення. При цьому ймовірність $P(\mathbf{S}_{1,a})$ поступово перестає залежати від надійності підсистеми s_d (надійності дамби).

При моделюванні перебігу аварії 2009 р. на Саяно-Шушенській ГЕС розглядалася система $\mathbf{S}_{2,a} = \{s_1, a_{1,2}, s_2\}$ у складі: агрегат ГЕС — основна підсистема (s_1); аварійний затвор — підсистема, що перебуває в "холодному" резерві (s_2); автоматичний перемикач на резерв ($a_{1,2}$). Припускалося, що підсистема s_2 має вмикатися в роботу автоматичним перемикачем у разі відмови основної підсистеми й попереджувати подальший розвиток аварії.

Враховувалися два можливі, несумісні, сценарії розвитку аварії: сценарій A_1 — при працездатному автоматичному перемикачеві на резерв відмовляють основна s_1 та резервна s_2 підсистеми; сценарій A_2 — спочатку відмовляє автоматичний перемикач на резерв $a_{1,2}$, а потім відмовляє s_1 [9].

Несумісність сценаріїв A_1 і A_2 дає змогу при оцінці ймовірності аварії в системі $\mathbf{S}_{2,a}$ скористатись формулою повної ймовірності

$$P(\mathbf{S}_{1,a}) = P(A_1) + P(A_2), \qquad (9)$$

де $P(A_1)$, $P(A_2)$ — ймовірності реалізації сценаріїв A_1 і A_2, відповідно.

Ймовірність $P(A_1)$ визначимо за умови, що автоматичний перемикач $a_{1,2}$ безпосередньо при відмові підсистеми s_1, що резервується, знаходиться в працездатному стані (позначимо цю умову θ_1); ймовірність $P(A_2)$ — за умови, що $a_{1,2}$ переходить в непрацездатний стан ще при працездатній підсистемі, що резервується (нехай це буде умова θ_2).

Умови θ_1 та θ_2, за визначенням, формують повну групу подій. Оскільки сума ймовірностей умов θ_1 і θ_2 має дорівнювати одиниці, то для того щоб задати ймовірності реалізації цих умов достатньо визначити з якою ймовірністю відмовить пристрій $a_{1,2}$ до того, як відмовить підсистема s_1.

Для оцінки ймовірності відмови пристрою $a_{1,2}$ до того, як відмовить підсистема s_1, виділимо зі складу системи $\mathbf{S}_{2,a}$ деяку умовну систему $\mathbf{S}_{1,a}^{ir}$, що формується підсистемою s_1 та автоматичним перемикачем на резерв $a_{1,2}$.

Вважатимемо систему $\mathbf{S}_{1,a}^{ir}$ (індекс *ir* означає "без надмірності") працездатною, якщо працездатні як підсистема s_1, так і автоматичний перемикач на резерв $a_{1,2}$, та непрацездатною, якщо відмовить s_1 або $a_{1,2}$. Покладемо також, що між відмовами підсистеми s_1 та автоматичного перемикача на резерв $a_{1,2}$ стохастичний зв'язок відсутній, тобто s_1 і $a_{1,2}$ відмовляють з власних, незалежних, внутрішніх, причин.

Тоді ймовірність відмови пристрою $a_{1,2}$ до того, як відмовить основна підсистема s_1, може бути визначена як ймовірність відмови системи $\mathbf{S}_{1,a}^{ir}$ внаслідок виходу з ладу $a_{1,2}$.

Сформуємо повну групу подій, як і у випадку системних відмов A_1 і A_2, і скориставшись формулою повної ймовірності, будемо мати:

$$P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir}) = P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir}, s_1) + P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir}, a_{1,2}). \qquad (10)$$

де $$P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir}, s_1) = P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir} \mid s_1) P(s_1),$$

$$P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir}, a_{1,2}) = P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir} \mid a_{1,2}) P(a_{1,2}). \qquad (11)$$

В формулах (10), (11) $P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir}, s_1)$, $P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir}, a_{1,2})$ — безумовні ймовірності, $P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir} \mid s_1)$, $P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir} \mid a_{1,2})$ — умовні (байєсівські) ймовірності відмови системи $\mathbf{S}_{1,a}^{ir}$ внаслідок відмов підсистеми s_1 і пристрою $a_{1,2}$, відповідно.

Оскільки, за визначенням, для відповідних подій-відмов справедливо, що

$$(\mathbf{S}_{1,a}^{ir} \mid s_1) \cup (\mathbf{S}_{1,a}^{ir} \mid a_{1,2}) = \Omega, P(\Omega) = 1,$$
$$(\mathbf{S}_{1,a}^{ir} \mid s_1) \wedge (\mathbf{S}_{1,a}^{ir} \mid a_{1,2}) = \varnothing. \qquad (12)$$

то ймовірності

$$P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir} \mid s_1) = \frac{P(s_1)}{P(s_1) + P(a_{1,2})},$$

$$P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir} \mid a_{1,2}) = \frac{P(a_{1,2})}{P(s_1) + P(a_{1,2})}. \qquad (13)$$

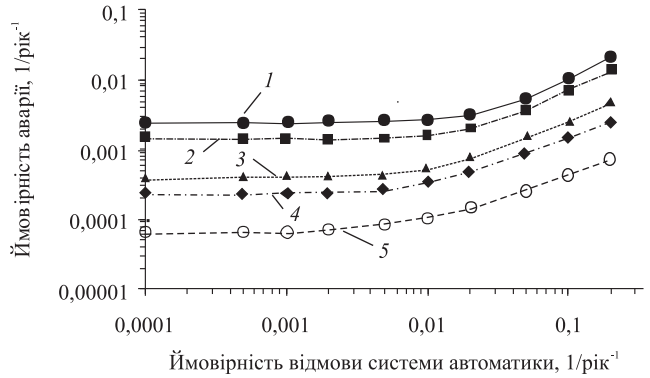

Рис. 4. **Графіки залежності ймовірності виникнення аварії в системі $\mathbf{S}_{2,a}$ від ймовірності відмови автоматичного перемикача на резерв $a_{1,2}$ при різних значеннях ймовірності руйнування гідроагрегату**

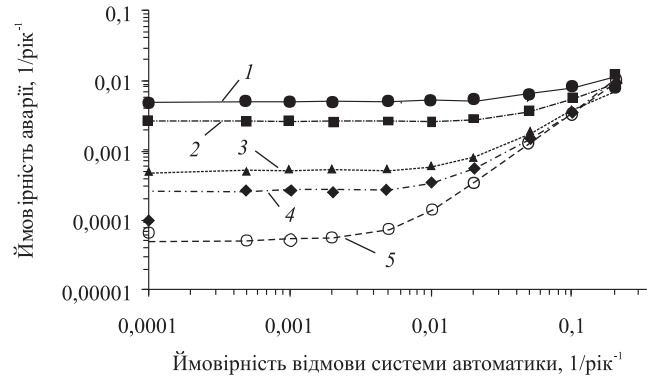

Рис. 5. **Графіки залежності ймовірності виникнення аварії в системі $\mathbf{S}_{2,a}$ від ймовірності відмови автоматичного перемикача на резерв $a_{1,2}$ при різних значеннях ймовірності відмови аварійно-ремонтного затвору**

Звідки
$$P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir}, a_{1,2}) = \frac{P^2(a_{1,2})}{P(s_1)+P(a_{1,2})}. \qquad (14)$$

$$P(\theta_2) = \frac{P^2(a_{1,2})}{P(s_1)+P(a_{1,2})}. \quad P(\theta_1) = 1 - \frac{P^2(a_{1,2})}{P(s_1)+P(a_{1,2})}. \qquad (15)$$

$$P(A_1) = P(s_1)P(s_2)\left[1 - \frac{P^2(a_{1,2})}{P(s_1)+P(a_{1,2})}\right].$$

$$P(A_2) = P(s_1)\frac{P^2(a_{1,2})}{P(s_1)+P(a_{1,2})}. \qquad (16)$$

$$P(\mathbf{S}_{2,a}) = P(s_1)\left[P(s_2) + \frac{P^2(a_{1,2})}{P(s_1)+P(a_{1,2})}(1-P(s_2))\right]. \qquad (17)$$

де $P(s_1)$, $P(a_{1,2})$, $P(s_2)$ — ймовірності відмов підсистем s_1, $a_{1,2}$, s_2, відповідно.

На Рис. 4 наведені графіки залежності ймовірності виникнення аварії в системі $\mathbf{S}_{2,a}$ від ймовірності відмови автоматичного перемикача на резерв $a_{1,2}$ при різних значеннях ймовірностей відмов підсистеми s_1 (ймовірностей руйнування гідроагрегату через незалежні від роботи автоматики причини): *1* — $P(s_1) = 10^{-1}$, рік$^{-1}$; *2* — $P(s_1) = 5 \cdot 10^{-2}$, рік$^{-1}$; *3* — $P(s_1) = 10^{-2}$, рік$^{-1}$; *4* — $P(s_1) = 5 \cdot 10^{-3}$, рік$^{-1}$; *5* — $P(s_1) = 10^{-3}$, рік$^{-1}$. Ймовірність $P(s_2)$ відмови аварійно-ремонтного затвору (підсистеми s_2) приймалася згідно зі статистичними даними рівною $P(s_2) = 10^{-2}$, рік$^{-1}$ [10].

Додатково було проаналізовано вплив надійності аварійно-ремонтного затвору на ймовірність відмови системи $\mathbf{S}_{2,a}$. На Рис. 5 наведені графіки залежності ймовірності виникнення аварії в системі $\mathbf{S}_{2,a}$ від ймовірності відмови автоматичного перемикача на резерв $a_{1,2}$ при різних значеннях ймовірностей відмов аварійно-ремонтного затвору (підсистеми s_2): *1* — $P(s_2) = 10^{-1}$, рік$^{-1}$; *2* — $P(s_2) = 5 \cdot 10^{-2}$, рік$^{-1}$; *3* — $P(s_2) = 10^{-2}$, рік$^{-1}$; *4* — $P(s_2) = 5 \cdot 10^{-3}$, рік$^{-1}$; *5* — $P(s_1) = 10^{-3}$, рік$^{-1}$. Ймовірність руйнування гідроагрегату в результаті незалежних від роботи автоматики причин (відмови підсистеми s_1) приймалася рівною $P(s_1) = 5 \cdot 10^{-2}$, рік$^{-1}$, яка визначає 95 % його надійність.

Можна зауважити, що в обох випадках, коли ймовірність відмови автоматичного перемикача на резерв $a_{1,2}$ перевищує величину близьку до 10^{-2}, рік$^{-1}$, ймовірність аварії в системі $\mathbf{S}_{2,a}$ починає стрімко зростати навіть при незначних змінах ймовірності відмови автоматики в сторону збільшення.

Висновок.

Недостатня надійність автоматичних систем, що встановлюються на гідроенергетичних об'єктах з метою регулювання режимів їх експлуатації тощо, може призводити до ініціювання можливих аварій на об'єктах, а у випадку виникнення аварій — сприяти негативному їх перебігу, в тому числі і в напрямку посилення руйнівних процесів. Критичним значенням ймовірності відмов автоматики з точки зору забезпечення належної надійності автоматичних засобів регулювання та керування на об'єктах гідроенергетики, яке, з досвіду аварій на ГАЕС Таум Саук і Саяно-Шушенській ГЕС, не слід ні в якому разі перевищувати, можна вважати оцінку 10^{-2}, рік$^{-1}$. При ймовірності відмов 10^{-3}, рік$^{-1}$, і менше, вплив можливих відмов засобів автоматики на аварійність гідроенергетичних об'єктів практично зникає.

ЛІТЕРАТУРА

1. *http:*//www.ferc.gov/industries/hydropower/safety/-projects/taum-sauk/staff-rpt.asp. Taum Sauk Pumped Storage Project (No. P-2277). Dam Breach Incident. Incident Description. FERC Staff Report, April 28, 2006.

2. *http:*//www.ferc.gov/industries/hydropower/safety/-projects/taum-sauk/ipoc-rpt/full-rpt.pdf. Taum Sauk Pumped Storage Project (No. P-2277). Dam Breach Incident. Incident Description. ERC Independent Panel of Consultants (IPOC) Report, May 25, 2006.

3. *http*://ru.wikisource.org/wiki/ Акт технического расследования причин аварии на Саяно-Шушенской ГЭС 17 августа 2009 года. Материал из Викитеки — свободной библиотеки.

4. *http*://www.powermag.com/issues/features/Investigating-the-Sayano-Shushenskaya-Hydro-Power-Plant-Disaster_3229.html. Investigating the Sayano-Shushenskaya Hydro Power Plant Disaster// By A Boyko and S Popov, EKRA-Sibir Ltd. and Nemanja Krajisnik, Siemens Transmission and Distribution Ltd.

5. *Брызгалов В.И.* Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций. Красноярск: Сибирский изд. дом "Суриков", 1999. — 562 с.

6. *Гидротехническое* строительство. НТФ "Энергопрогресс". Ежемесячный научно-технический журнал. — 2008. —№ 11.

7. *Стефанишин Д.В., Романчук К.Г.* Про граничні оцінки ймовірностей техногенних аварій внаслідок малоймовірних сполучень навантажень// Problems of decision making under uncertainties. Abstracts of XVI Int. Conf. Yalta, Ukraine, October 4—8, — 2010. — P. 128—129.

8. *Стефанишин Д.В.* Вибрані задачі оцінки ризику та прийняття рішень за умов стохастичної невизначеності. — К.: Азимут-Україна, 2009. — 104 с.

9. *Стефанишин Д.В., Романчук К.Г.* Оцінка ймовірності відмови зарезервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв// Вісник НУВГП. Зб. наук. праць. Вип. 4 (44). Рівне: НУВГП. — 2008. — С. 334—340.

10. *Lagerholm S.* Safety and reliability of spillway gates// Repair and upgrading of dams Symposium. —Stockholm: — 1996. — P. 362—373.

© Романчук К.Г., Стефанишин Д.В., 2014

УДК 621.313

ГРУБОЙ А.П., главный конструктор,
ДЬЯКОВ В.И., канд. техн. наук, гл. научн. сотр.,
КУБАНОВ В.Г., зам. гл. конструктора,
САЛТОВСКАЯ Д.А., вед. инж., ГП завод "Электротяжмаш"

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОНТРОЛЯ ПОДПЯТНИКОВ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ГИДРОАГРЕГАТОВ

Подпятники вертикальных гидроагрегатов являются предельно нагруженными конструктивными элементами с удельными нагрузками на опорные поверхности трения сегментов до 65 ÷ 70 кгс/см^2 и температурами масла в зонах трения до 95 ÷ 100 °С.

В связи с этим к узлам подпятника и к подпятнику в целом предъявляются высокие требования на всех стадиях их создания и функционирования: при проектировании и изготовлении на заводе, при сборке и монтаже на ГЭС и ГАЭС, при эксплуатации.

Эти требования зафиксированы в методических указаниях по эксплуатации подпятников вертикальных гидроагрегатов РД 34.31.501-97.

Основные из них заключаются в следующем. Макронеровность зеркальной поверхности диска подпятника в радиальном направлении не должна превышать 0,03 мм для дисков диаметром до 2 м и 0,04 мм для дисков диаметром 2 м и более.

В тангенциальном направлении для жесткой опоры суммарная макронеровность зеркальной поверхности диска подпятника и неперпендикулярность его к оси вала гидроагрегата должна быть не более 0,08 мм для однорядных подпятников и не более 0,12 мм для двухрядных и гидравлических подпятников.

Шероховатость зеркальной поверхности диска должна быть не более 0,32 мкм и не менее 0,16 мкм. В отдельных местах, не более 10 % зеркальной поверхности диска возле наружного и внутреннего диаметров, где нет соприкосновения диска с поверхностью сегментов, допустима чистота 0,63 мкм.

Равномерность распределения нагрузки между сегментами должна обеспечиваться с точностью до 10 % для подпятников с любым типом покрытий сегментов — баббиттовых или фторопластовых. Разность регулировки высотного положения сегментов для подпятников на гидравлической опоре должна быть не более 0,2 мм.

Тангенциальный и радиальный эксцентриситеты сегментов должны устанавливаться для каждого подпятника в зависимости от его параметров (окружная скорость, конфигурация сегментов и др.). Значение оптимальной величины эксцентриситетов устанавливается расчетным путем и, при необходимости, уточняется специальными испытаниями.

Неправильная установка значения тангенциального эсцентриситета уменьшает несущую способность сегментов подпятника, а отклонения в установке радиального эксцентриситета приводят к ускоренному износу наружной или внутренней частей рабочих поверхностей сегментов.

Необходимым условием надежной работы подпятника является обеспечение самоустанавливаемости сегемента — возможность легкого по-