



ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ У МЕРЕЖІ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

В статті розглянута проблема оцінювання технічного стану пристроїв релейного захисту мережі власних потреб ГЕС в умовах великої кількості невизначеностей. Удосконалено метод "дерева відмов" для оцінювання імовірності відмови схеми релейного захисту на інтервалі часу шляхом урахування індивідуальних характеристик елементів розглядуваної схеми та умов їхнього функціонування. Розроблено нечіткі моделі для оцінювання технічного стану елементів схеми релейного захисту з використанням даних, що визначаються як під час періодичних перевірок, так і в режимі "on-line". Запропоновано використання отриманих результатів для оптимізації графіку періодичних перевірок пристроїв релейного захисту мережі власних потреб ГЕС.

К л ю ч о в і с л о в а: релейний захист, технічний стан, імовірність, дерево відмов, нечітка модель, трансформатор струму, мікропроцесорне реле.

В теперішній час гідроелектростанції (ГЕС) України працюють у дуже важких режимах. В першу чергу, це пов'язано з тим, що частина електрообладнання ГЕС Дніпровського каскаду фізично та морально застаріла, а обладнання, яке замінено під час 2-го етапу Реконструкції, зараз знаходиться на етапі припрацювальних відмов. По-друге, це пов'язано з тим, що гідроагрегати ГЕС України працюють в системі групового регулювання активної потужності (ГРАП), що обтяжує режими роботи основного та допоміжного обладнання ГЕС. По-третє, в сучасних умовах, коли генерація теплових електростанцій України є обмеженою через нестачу первинного палива, на електростанції, що використовують інші види первинної енергії, в тому

числі ГЕС, лягає додаткове навантаження та додаткові вимоги щодо їхньої надійності та живучості.

В таких умовах дуже важливою є надійна робота системи власних потреб ГЕС, яка забезпечує нормальне функціонування всієї станції. Через значне зношення обладнання мереж власних потреб ГЕС Дніпровського каскаду підвищується імовірність виникнення пошкоджень у ній, які можуть перерости в значні аварії.

Для запобігання розвитку аварій в мережі власних потреб ГЕС важливою є правильна та надійна робота релейного захисту (РЗ) мережі власних потреб. Для кількісного оцінювання надійності пристроїв РЗ необхідний підхід, який би комплексно враховував структурну надійність схеми РЗ, наявний технічний стан її елементів та умови функціонування вторинного обладнання.

В якості інтегрального критерію оцінювання надійності схем РЗ доцільно використовувати величину технічного ризику, яка враховує імовірність виникнення аварії, сценарій її розвитку та можливі наслідки.

Оцінювання надійності пристроїв РЗ відбувається в умовах неповноти та різноманітності вихідних даних про його стан. В таких умовах для оцінювання стану пристроїв РЗ мережі власних потреб ГЕС умісно застосувати

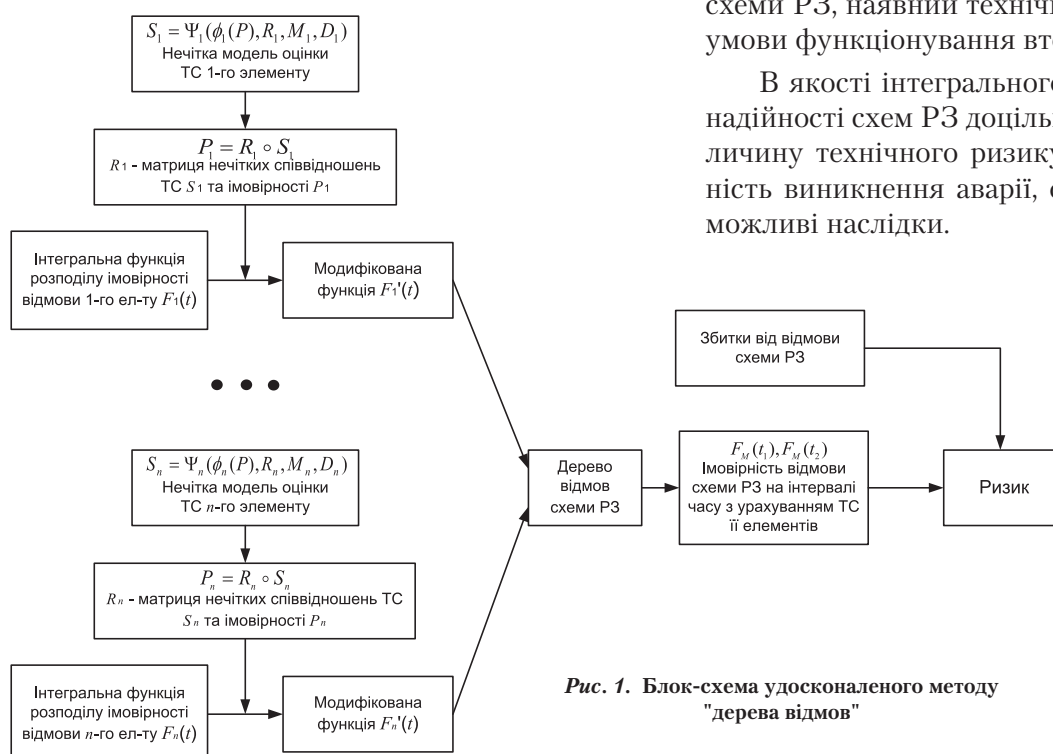


Рис. 1. Блок-схема удосконаленого методу "дерева відмов"

нечітко-імовірнісний підхід.

Задача визначення технічного стану, імовірностей та ризиків відмов РЗ є дуже складною внаслідок існування наступних факторів [1]:

- більше 99% всього часу експлуатації схеми РЗ знаходяться в режимі "очікування", наслідком чого основну небезпеку становлять "приховані відмови", які проявляються не в момент виникнення, а лише під час спрацювання захисту;
- різноманітність видів відмов пристроїв та схем РЗ;
- різноманітність видів пошкоджень, на які реагує пристрій РЗ;
- складність пристроїв та схем РЗ;
- наявність взаємозв'язків між окремими пристроями РЗ та наявність резервування.

Для кількісного оцінювання імовірності відмови у спрацюванні РЗ на інтервалі часу необхідно визначитись з методом оцінювання надійності. Аналіз існуючих методів показав, що для кількісного визначення імовірності найбільше підходить метод "дерева відмов" [2,3], який дозволяє визначити шукану величину як функцію від показників надійності елементів, що складають схеми РЗ як на електромеханічній так і на мікропроцесорній базі. Також цей метод є адаптивним до врахування технічного стану окремих елементів схем РЗ.

Удосконалений шляхом використання статистичних функцій розподілу імовірності відмови з урахуванням фактичного стану елементів захисту метод "дерева відмов" представлено у вигляді блок-схеми на Рис. 1.

Формування дерева відмов починається з формулювання кінцевої події про відмову системи. Для побудови дерева відмов використовується метод мінімальних перетинів або метод розкладання по елементам. Суть обох цих методів полягає в тому, що при описі умов непрацездатності системи слід використовувати тільки такі поєднання несправностей, з яких не можна виключити жоден елемент без того, щоб система стала працездатною. За результатом побудови дерева відмов складається послідовний ланцюг з мінімальних перетинів (ланок), які представляють собою паралельне з'єднання елементів захисту, одночасна відмова яких робить захист непрацездатним [3].

Для визначення імовірності знаходження схеми РЗ в непрацездатному стані на інтервалі часу $\Delta t = t_2 - t_1$ необхідно визначити імовірності відмови захисту в моменти часу t_1 і t_2 . Вони визначаються за ланцюгом відмов пристрою РЗ:

$$Q(t) = 1 - P_1(t) \cdot \dots \cdot P_i(t) \cdot \dots \cdot P_m(t), \quad (1)$$

де $P_i(t)$ – імовірність безвідмовної роботи в момент часу t i -ї ланки ланцюга відмов об'єкта. Оскільки ланки у ланцюгу з'єднані послідовно, імовірність безвідмовної роботи ланцюга визначається як добуток імовірностей безвідмовної роботи всіх ланок.

В свою чергу, імовірність безвідмовної роботи кожної ланки $P_i(t)$ визначається як сума імовірностей сумісних подій, так як кожна ланка представляє собою паралельне з'єднання елементів РЗ, одночасна відмова яких призводить до непрацездатності всього захисту. В загальному випадку для i -ї ланки з n паралельних елементів імовірність безвідмовної роботи складає:

$$P_i(t) = \sum_{j=1}^n P_{W_j}(t) - \sum_{j,k=1, j \neq k}^n P_{W_j}(t)P_{W_k}(t) + \dots + \sum_{j,k=1, j \neq k \neq l}^n P_{W_j}(t)P_{W_k}(t)P_{W_l}(t) - \dots, \quad (2)$$

де $P_{W_j}(t)$ – імовірність безвідмовної роботи елемента РЗ W_j , $j \in W$, де W – множина елементів, з яких складається схема захисту.

Імовірності безвідмовної роботи елементів схеми РЗ визначаються за статистичними інтегральними функціями розподілу імовірності відмов, модифікованими з урахуванням фактичного технічного стану кожного окремого елемента захисту $F'_j(t)$, $j \in W$:

$$P_{W_j}(t) = 1 - F'_j(t). \quad (3)$$

Для кількісного оцінювання надійності схем

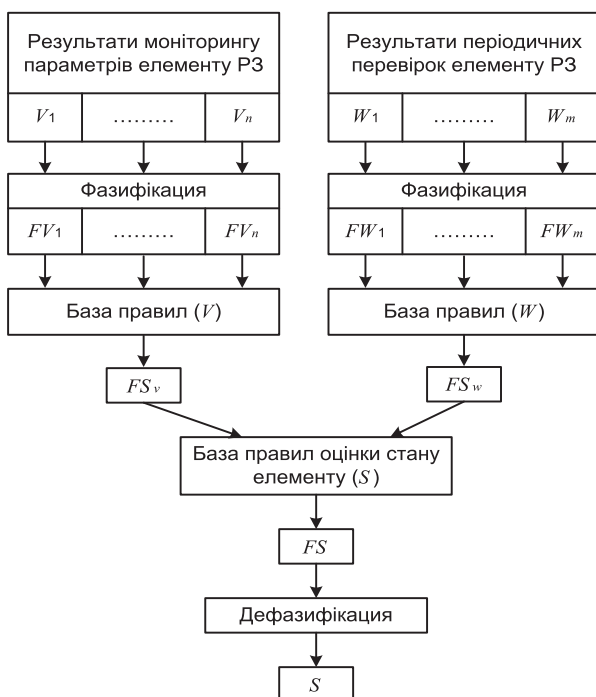


Рис. 2. Структурна схема нечіткої моделі стану елемента РЗ



РЗ за удосконаленим методом дерева відмов необхідно знати статистичні функції розподілу імовірностей відмови елементів, що входять до схеми РЗ. Для їх визначення необхідно виконати обробку статистичних даних з відмов елементів схем РЗ.

Нехай статистичні дані з відмов елемента РЗ представлені у вигляді залежності $m(t)$, де m – кількість відмов елементів розглядуваного типу на інтервалі часу $\Delta t \in t$, якщо загальна кількість однотипних елементів за якими ведеться спостереження складає N . За цією інформацією будується гістограма розподілу параметра потоку відмов розглядуваного елемента за виразом:

$$\omega(t) = m/N\Delta t. \quad (4)$$

За отриманою залежністю $\omega(t_i)$ будується інтегральна функція розподілу імовірності відмов:

$$F(t) = \int_0^t \omega(t) dt. \quad (5)$$

Для модифікації інтегральної статистичної функції $F(t)$ певного типу обладнання (трансформатор струму, мікропроцесорне реле) для окремої одиниці обладнання застосовано ієрархічні нечіткі моделі [4], за якими виконується оцінювання технічного стану елементів пристроїв РЗ. Такі моделі використовують в якості вхідної інформації дані, визначені під час періодичних перевірок пристроїв РЗ та дані, які можна визначити в режимі "on-line" без виведення захисту в ремонт. Структурну схему такої моделі представлено на Рис. 2.

В якості прикладу, визначено імовірності відмови схем захистів комірок КРУ-6 кВ Дніпровської ГЕС-1, виконаних на базі мікропроцесорного реле МІСОМ Р139 при виникненні трифазного короткого замикання. Принципову схему захисту приведено на Рис. 3.

На Рис. 3: TA_A, TA_C – трансформатори струму у фазах A та C відповідно; Q – вимикач у комірці КРУ-6 кВ; YAT – електромагніт відключення вимикача; AK – мікропроцесорний пристрій релейного захисту.

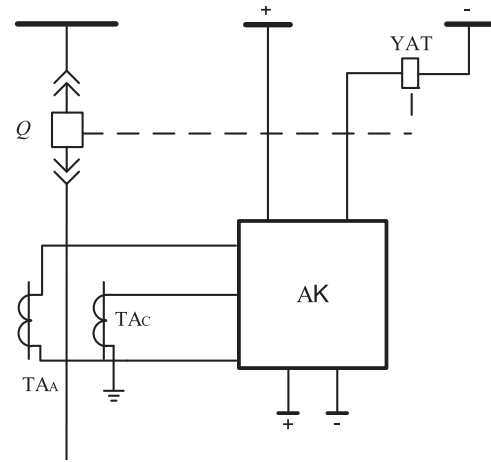


Рис. 3. Схема захисту комірки КРУ-6 кВ

Дерево відмов та побудований на його основі ланцюг відмов для схеми РЗ з Рис. 3 представлено на Рис. 4.

Імовірності безвідмовної роботи ланок ланцюга складають:

- $TA_A - TA_C$:

$$P_{M1}(t) = P_{TAA}(t) + P_{TAC}(t) - P_{TAC}(t)P_{TAA}(t); \quad (6)$$

- МПРЗ:

$$P_{M2}(t) = P_{AK}(t). \quad (7)$$

Імовірність відмови схеми РЗ на інтервалі часу:

$$Q_M(t) = 1 - P_{M1}(t)P_{M2}(t). \quad (8)$$

Для визначення імовірностей $P_{TAA}(t), P_{TAC}(t)$ та $P_{AK}(t)$ використано статистичні функції розподілу імовірностей відмови [5, 6], нечіткі моделі оцінювання стану трансформаторів струму та мікропроцесорних пристроїв РЗ та причинно-наслідкові співвідношення між станом об'єкта та умовними імовірностями підтвердження факту відмови/безвідмовної роботи об'єкта за наявності у нього відповідного технічного стану.

Нечітка модель для оцінювання технічного стану трансформатора струму використовує в якості вхідних характеристик наступні величини:

- коефіцієнт трансформації, K_{TC} , в.о.;
- опір ізоляції вторинних обмоток, $R_{изол}$, МОм;
- відхилення вольт-амперної характеристики від початкової, $\Delta U(I)$, %;
- різниця вторинних струмів у кернах, $\Delta I_{втор}$, %;
- вторинне навантаження, $Z_{нав}$, Ом.

Нечітка модель для оцінювання технічного стану мікропроцесорного реле використовує в якості вхідних характеристик наступні величини:

- відхилення уставок мікропроцесорного реле, ΔSet , %;

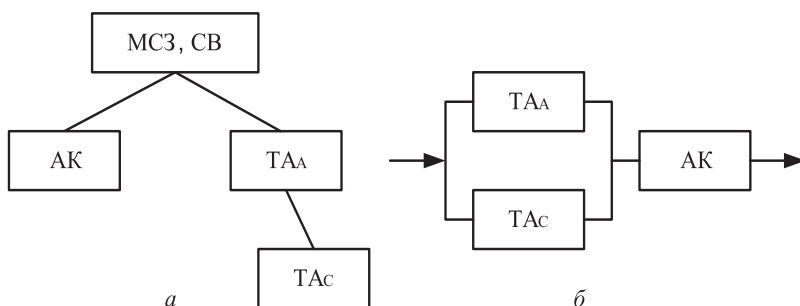


Рис. 4. Дерево (а) та ланцюг (б) відмов схеми РЗ комірки КРУ-6 кВ

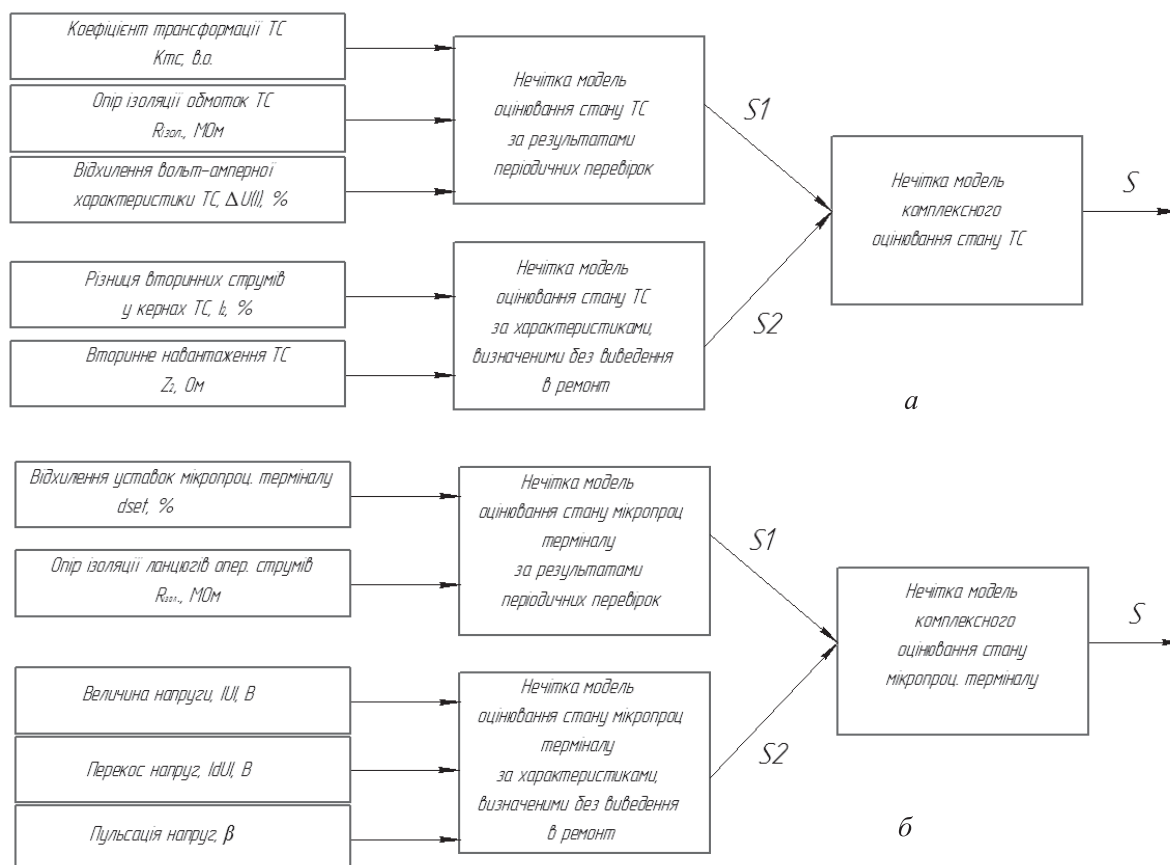


Рис. 5. Нечіткі моделі оцінювання ТС трансформатора струму (а) та мікропроцесорного реле (б)

Таблиця 1. Імовірності відмови трансформаторів струму ф.А

| № коміррки | S | q(H1) | q(H2) | q(B/H1) | q(B/H2) | q(Δt) |
|------------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|
| Д-1 | 0,3918 | 0,0055 | 0,9945 | 0,4613 | 0,5149 | 0,0049 |
| ЗТ-1 | 0,4218 | 0,0055 | 0,9945 | 0,4677 | 0,524 | 0,0049 |
| 4Т-3 | 0,4223 | 0,0055 | 0,9945 | 0,4677 | 0,524 | 0,0049 |
| ГЕС2-1 | 0,4803 | 0,0055 | 0,9945 | 0,4722 | 0,5367 | 0,0048 |
| 4Т-1 | 0,4146 | 0,0055 | 0,9945 | 0,4675 | 0,5235 | 0,0049 |
| 4Т-2 | 0,4342 | 0,0058 | 0,9942 | 0,4681 | 0,5252 | 0,0052 |
| ГЕС2-2 | 0,5181 | 0,0058 | 0,9942 | 0,5092 | 0,4939 | 0,0060 |
| ЗТ-2 | 0,3808 | 0,0058 | 0,9942 | 0,4615 | 0,515 | 0,0052 |
| Д-2 | 0,3726 | 0,0058 | 0,9942 | 0,4668 | 0,5204 | 0,0052 |

Таблиця 2. Імовірності відмови трансформаторів струму ф.С

| № коміррки | S | q(H1) | q(H2) | q(B/H1) | q(B/H2) | q(Δt) |
|------------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|
| Д-1 | 0,3918 | 0,0055 | 0,9945 | 0,4613 | 0,5149 | 0,0049 |
| ЗТ-1 | 0,3679 | 0,0055 | 0,9945 | 0,4669 | 0,5204 | 0,0049 |
| 4Т-3 | 0,3371 | 0,0055 | 0,9945 | 0,4692 | 0,5191 | 0,0050 |
| ГЕС2-1 | 0,4757 | 0,0055 | 0,9945 | 0,4722 | 0,5173 | 0,0050 |
| 4Т-1 | 0,393 | 0,0055 | 0,9945 | 0,4613 | 0,5149 | 0,0049 |
| 4Т-2 | 0,4407 | 0,0058 | 0,9942 | 0,4683 | 0,5196 | 0,0052 |
| ГЕС2-2 | 0,3877 | 0,0058 | 0,9942 | 0,4617 | 0,5155 | 0,0052 |
| ЗТ-2 | 0,393 | 0,0058 | 0,9942 | 0,4613 | 0,5149 | 0,0052 |
| Д-2 | 0,4184 | 0,0058 | 0,9942 | 0,4675 | 0,52 | 0,0052 |

- опір ізоляції кіл оперативного струму, $R_{ізол.}$ МОм;

- величина напруги живлення, U , В;
- перекіс напруги живлення, $|\Delta U|$, В;
- пульсація напруги живлення, β , В.

Нечіткі моделі для оцінювання технічного стану трансформатора струму та мікропроцесорного реле представлено на Рис. 5.

За нечіткими моделями визначено ТС S трансформаторів струму у фазах А та С, а також мікропроцесорного реле. За функціями $F(t)$ визначено безумовні імовірності відмови та безвідмовної роботи $q(H1)$ та $q(H2)$ цих елементів. За матрицями причинно-наслідкових співвідношень визначено умовні імовірності підтвердження факту відмови та безвідмовної роботи об'єкта $q(B/H1)$ $q(B/H2)$ наявністю у нього технічного стану S [7]. За теоремою Байєса [2] визначено умовні імовірності відмови елементів схеми захисту коміррки КРУ-6 кВ на інтервалі часу 3 місяці. Результати внесені в Табл. 1 – Табл. 3.

За методом "дерева відмов" визначено імовірність відмови схем РЗ коміррок КРУ-6 кВ на інтервалі часу 3 міс. Результати внесені в Табл. 4.



Отримані значення імовірностей відмови на інтервалі часу свідчать про високий рівень надійності схем РЗ мережі власних потреб Дніпровської ГЕС-1 (імовірність відмови в межах 1...2%). Вони можуть бути використані для оптимізації графіків періодичних перевірок пристроїв РЗ. Також слід зазначити, що сфера застосування запропонованого методу не обмежується захистами мережі власних потреб ГЕС, а може бути використана для будь-яких схем РЗ.

Подальший напрям досліджень передбачається у розробленні методів та моделей кількісного оцінювання впливу умов функціонування пристроїв РЗ (температура, вологість, вібрація, забрудненість) на надійність схем РЗ. Також важливим є визначення методики оцінювання збитків при відмовах РЗ, що дозволить перейти від аналізу імовірностей відмов РЗ на інтервалі часу до аналізу ризиків.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Літвінов В.В.* Оцінювання надійності пристроїв релейного захисту за допомогою ієрархічних схем нечіткого виводу / В.В. Літвінов, Я.С. Саченко // Відновлювана енергетика XXI століття. Матеріали XV ювілейної міжнародної науково-практичної конференції. — Київ, 2014. — С. 261–264.
2. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. — М.: Наука, 1969. — 366 с.
3. *Шалин А.И.* Надёжность и диагностика релейной защиты энергосистем: учебник / А.И. Шалин. — Новосибирск: НГТУ, 2002. — 384 с.
4. *Штовба С.Д.* Проектирование начётких систем средствами MatLab / С.Д. Штовба. — М.: Горячая линия — Телеком, 2007. — 288 с.
5. *Лоханин А.К.* Обеспечение работоспособности маслонаполненного высоковольтного оборудования после расчетного срока службы / А. К. Лоханин, В. В. Соколов // Электро. — 2002. — № 1. — С. 10–16.

Таблиця 3. Імовірності відмови мікропроцесорних реле

| № коміррки | S | q(H1) | q(H2) | q(B/H1) | q(B/H2) | q(Δt) |
|------------|--------|--------|--------|---------|---------|-----------------|
| Д-1 | 0,3988 | 0,017 | 0,983 | 0,4611 | 0,5165 | 0,0152 |
| ЗТ-1 | 0,3764 | 0,017 | 0,983 | 0,4614 | 0,517 | 0,0152 |
| 4Т-3 | 0,3838 | 0,017 | 0,983 | 0,4613 | 0,5169 | 0,0152 |
| ГЕС2-1 | 0,3988 | 0,017 | 0,983 | 0,4609 | 0,5162 | 0,0152 |
| 4Т-1 | 0,401 | 0,017 | 0,983 | 0,4642 | 0,5196 | 0,0152 |
| 4Т-2 | 0,4099 | 0,0185 | 0,9815 | 0,4645 | 0,5199 | 0,0166 |
| ГЕС2-2 | 0,4341 | 0,0185 | 0,9815 | 0,4682 | 0,5198 | 0,0167 |
| ЗТ-2 | 0,4123 | 0,0185 | 0,9815 | 0,4676 | 0,5202 | 0,0167 |
| Д-2 | 0,4077 | 0,0185 | 0,9815 | 0,4642 | 0,5196 | 0,0166 |

Таблиця 4. Імовірності відмови схем захистів комірок КРУ-6 кВ

| № коміррки | $q_{TT-A}(\Delta t)$ | $q_{TT-C}(\Delta t)$ | $q_{MPP3}(\Delta t)$ | q(Δt) |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------|
| Д-1 | 0,0049 | 0,0049 | 0,0152 | 0,015224 |
| ЗТ-1 | 0,0049 | 0,0049 | 0,0152 | 0,015224 |
| 4Т-3 | 0,0049 | 0,0050 | 0,0152 | 0,015224 |
| ГЕС2-1 | 0,0048 | 0,0050 | 0,0152 | 0,015224 |
| 4Т-1 | 0,0049 | 0,0049 | 0,0152 | 0,015224 |
| 4Т-2 | 0,0052 | 0,0052 | 0,0166 | 0,016627 |
| ГЕС2-2 | 0,0060 | 0,0052 | 0,0167 | 0,016731 |
| ЗТ-2 | 0,0052 | 0,0052 | 0,0167 | 0,016727 |
| Д-2 | 0,0052 | 0,0052 | 0,0166 | 0,016627 |

6. *Ridwan M.I.* Application of Life Data Analysis for the Reliability Assessment of Numerical Overcurrent Relays / M.I. Ridwan, K.L. Yen, A. Musa, B. Yunus // World Academy of Science, Engineering and Technology. — Volume 48. — 2010. — P. 969–975.

7. *Літвінов В.В.* Оцінка ризику порушення стійкості двигунового навантаження при відмовах електрообладнання в підсистемі ЕЕС [Текст] Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: (05.14.02 — електричні станції, мережі та системи). — К., 2012. — 20 с.

