



большинстве случаев оказывается меньше магнитопровода, срок службы трансформатора в основном определяется по степени износа целлюлозной изоляции.

Вывод. Все блочные силовые трансформаторы (кроме Т-4) требуют замены на современные.

Замена трансформаторов даст значительное сокращение потерь активной энергии (см. Табл. 2) и обеспечит надёжную и эффективную работу Каховской ГЭС. Замена одного трансформатора приведет к сокращению потерь энергии в среднем до 1 млн. кВт·ч в год.

© Бородаенко А.С., 2011



УДК 621.311

БАРДИК Є.І., канд. техн. наук., доцент., НТУУ "КПІ"

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІНЕННЯ РЕСУРСНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ ЧАСОВИХ РЯДІВ

Забезпечення надійності функціонування генеруючого обладнання ГЕС та ГАЕС електроенергетичних систем (ЕЕС), що здійснюють електропостачання споживачів, є однією з основних багатопланових проблем електроенергетики. Рівень надійності електропостачання споживачів значною мірою залежить від технічного стану силового генеруючого і комутаційного обладнання, зношення якого на сьогоднішній день сягає 60–70 %, що призводить до збільшення імовірності його відмов, підвищення аварійності в ЕЕС [5–10]. Відмови окремих елементів систем ЕЕС не завжди є локальними подіями і можуть викликати відмови непошкодженого обладнання. Це, в свою чергу, зумовлює необхідність надійного функціонування комутаційних апаратів, що здійснюють автоматичне управління роботою системи електропостачання.

Для вирішення задач управління ресурсом необхідна розробка математичних моделей прогнозування змінення залишкового ресурсу вимикача на основі яких можна визначити можливість вичерпання ресурсу працездатності (прогнозувати відмови) і страхувати ризик відмови відповідальних підсистем ЕЕС, які забезпечують електропостачання споживачів.

Аналіз відмов високовольтних вимикачів показав, що найбільш пошкоджуваними елементами повітряного вимикача є привод, дугогасний пристрій і внутрішня ізоляція, ущільнення, причому частка відмов дугогасного пристрою іноді сягає 20–27%. Очевидно, що одним з найбільш визначальних параметрів щодо прогнозування

вичерпання ресурсу працездатності вимикача є комутаційний ресурс, найбільше спрацювання якого виникає при комутації струмів короткого замикання (КЗ) [6–8].

В [7–9] докладно висвітлені основні положення методик визначення спрацьованого і залишкового ресурсу вимикача, якщо відомі значення комутуваного струму і кількості комутацій. При їх використанні оцінка спрацьованого ресурсу вимикачів виконується шляхом підсумовування спрацьованого ресурсу після виконання кожного КЗ. Але як показано в [8] на практиці в ЕЕС в більшості випадків відсутні датчики, які фіксують короткі замикання. У цьому випадку, інформацію щодо величини комутуваного струму і кількості комутацій одержують на основі аналізу і обробки статистичних даних про короткі замикання в електропередачі і електрообладнанні.

Разом з цим в існуючих і створюваних сучасних системах моніторингу комутаційного обладнання енергосистем передбачається безперервна реєстрація, як в нормальних так і в аварійних режимах, значень комутуваного вимикачем струму. Крім того, системи моніторингу, зазвичай, здійснюють не тільки оцінку, але й прогнозування ресурсу працездатності комутаційного обладнання і тому створення відповідного математичного і програмного забезпечення, яке є складовою частиною експертних систем моніторингу комутаційного обладнання, є актуальною задачею.

В більшості випадків для виконання необхідних розрахунків визначення спрацювання комутаційного ресурсу потрібно мати аналітичну



залежність числа гарантованих відключень від струму, що вимикається $n_{\text{доп}} = f(I_{\text{від}}^*)$ [1, 8, 9]. Для деяких серій вимикачів заводи-виробники дають такі залежності. В іншому випадку така залежність у вигляді різних відображаючих функцій може бути побудована методом найменших квадратів по трьом або чотирьом значенням відключаємих струмів

В [8] показано, що найбільш адекватно наявні дані описує гіперболічна залежність

$$n_{\text{доп}} = A + B/I_{\text{від}}^*; I_{\text{від}}^* = I_{\text{від}}/I_{\text{від,н}}$$

де $n_{\text{доп}}$ – допустиме число операцій включення і відключення вимикача при $I = I_{\text{від}}^*$. Спрацьований комутаційний ресурс в цьому випадку визначається:

$$R_{\text{ком}}^{\text{сп}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{кз}}} \frac{I_{\text{від,і}}^* \cdot N_{\text{кз,і}}}{A \cdot I_{\text{від,і}}^* + B}, \text{ якщо } I_{\text{ном}} \leq I_{\text{від,і}} \leq I_{\text{від,ном}};$$

$$R_{\text{ком}}^{\text{сп}} = \sum_{i=1}^{N'_{\text{кз}}} \frac{I_{\text{від,і}}^{*\prime} \cdot N'_{\text{кз,і}}}{A' \cdot I_{\text{від,і}}^{*\prime} + B'}, \text{ якщо } 0 \leq I_{\text{від,і}} \leq I_{\text{ном}}$$

де $N_{\text{кз}}, N'_{\text{кз}}, N_{\text{кз,і}}, N'_{\text{кз,і}}$ – загальна кількість КЗ і число відключень КЗ зі струмами $I_{\text{від,і}}^*$ та $I_{\text{від,і}}^{*\prime}$ відповідно; $I_{\text{від,і}}^*$ – струм відключення в долях від номінального, $I_{\text{від,і}}^{*\prime}$ – струм відключення в долях від номінального струму відключення; A, B, A', B' – постійні коефіцієнти.

Задача прогнозування вичерпання комутаційного ресурсу вимикача, як зазначалось, в загальному випадку є достатньо складною проблемою внаслідок високого рівня невизначеності подій, пов'язаних як з моментом виникнення КЗ, так і зі значенням струму, що вимикається $I_{\text{від,і}}^*$.

На сьогоднішній день не існує єдиної універсальної методики визначення терміну вичерпання комутаційного ресурсу високовольтних вимикачів. Тому очевидно, що для прогнозування змінення цього параметра необхідно використовувати різні методики і моделі, а для остаточного прийняття рішення щодо виведення вимикача в ремонт необхідно враховувати результати, одержані з використанням всіх існуючих методик і моделей. Нижче наведено один із існуючих підходів до вирішення цієї проблеми.

Як показує практика оцінки і прогнозування ресурсу електрообладнання ЕЕС, традиційний шлях врахування факторів невизначеності на основі імовірнісного і статистичного моделювання часто є неадекватним вирішуваним задачам і може призвести навіть до неправильних результатів, оскільки його функціонування на практиці харак-

теризується невизначеністю "не стохастичного" типу. Часовий ряд змінення ресурсних параметрів відповідального силового і комутаційного обладнання при цьому характеризується такими особливостями: невідомі імовірнісні характеристики стохастичного процесу, мала кількість елементів вибірки, невизначеність і неповнота інформації про функціонування об'єкта [2, 3].

Тому використання моделей замінювання параметрів технічного стану у вигляді випадкових процесів і розрахунок параметрів спрацьованого і залишкового ресурсу через параметри випадкового процесу не завжди дають можливість визначити прогноз моменту появи граничного стану.

Для підвищення якості і достеменності рішень, які приймаються при прогнозуванні вичерпання ресурсу, з урахуванням всієї множини факторів, що впливають на їх результати, необхідний системний підхід, який ґрунтується на досвіді, знаннях і аргументованих судженнях (експертних оцінках) спеціалістів-експертів з використанням інтелектуальних методів аналізу часових рядів. Основним математичним апаратом формалізації, представлення і обробки експертних оцінок є теорія нечітких множин [4].

У відповідності з вищезазначеним, спрацьований комутаційний ресурс, який визначається по формулі (1), можна вважати нечіткою випадковою змінною. Динамічний розвиток змінювання спрацьованого комутаційного ресурсу $R_{\text{к}}^{\text{сп}}(t)$ в часі можна представити у вигляді нечіткого часового ряду $\tilde{R}_{\text{к}}^{\text{сп}}(t_1), \tilde{R}_{\text{к}}^{\text{сп}}(t_2), \dots, \tilde{R}_{\text{к}}^{\text{сп}}(t_n)$, який представляє собою деяку впорядковану послідовність спостережень над змінюванням у часі ресурсу вимикача, значення якого в момент часу t_i виражається за допомогою нечіткої змінної (характеризується лінгвістичним термом і трикутною функцією належності). Прогнозування вичерпання комутаційного ресурсу вимикача полягає в тому, щоб знайти момент часу, коли $\tilde{R}_{\text{к}}^{\text{сп}}(t)$ досягне граничного значення.

Визначення терміну вичерпання комутаційного ресурсу високовольтного вимикача здійснюється порівнянням нечітких множин граничних значень спрацьованого комутаційного ресурсу $\tilde{R}_{\text{к,гр}}^{\text{сп}}$ з прогнозними значеннями $R_{\text{к}}^{\text{сп}}$ у відповідності з [11]:

$$\mu(\tilde{R}_{\text{к,гр}}^{\text{сп}}, \tilde{R}_{\text{к}}^{\text{сп}}) = \bigwedge_{\tilde{R}_{\text{к}}^{\text{сп}} \in X} (\mu_{R_{\text{к,гр}}}(\tilde{R}_{\text{к}}^{\text{сп}}) \leftrightarrow \mu_{R_{\text{к}}}(\tilde{R}_{\text{к}}^{\text{сп}})),$$

де X – універсальна множина дійсних чисел, \leftrightarrow



Таблиця 1. Струми та спрацювання ресурсу вимикача ВНВ-330

Час (роки), t	Величина струму кЗ		Спрац. рес. при даному вимкненні, $R_{к.і}^{сп}$	Загальне спрацювання ресурсу вимикача, $R_{к}^{сп}$
	$(I_{к}, \text{кА})$	$I_{к}^* (\text{в.о.})$		
0	-	-	-	0
0,5	-	-	-	0
1	41	0,651	0,117	0,117
1,5	30	0,476	0,094	0,211
2	-	-	-	0,211
2,5	54	0,857	0,14	0,351
3	42	0,667	0,119	0,524
3,5	15	0,238	0,054	0,524
3,5	-	-	-	0,524

Таблиця 2. Струми та спрацювання ресурсу вимикача ВГУ-110

Час (роки), t	Величина струму кЗ		Спрац. рес. при даному вимкненні, $R_{к.і}^{сп}$	Загальне спрацювання ресурсу вимикача, $R_{к}^{сп}$
	$(I_{к}, \text{кА})$	$I_{к}^* (\text{в.о.})$		
0	-	-	-	0
1	32	0,8	0,113	0,113
2	12	0,3	0,024	0,194
2	22	0,55	0,057	0,194
3	-	-	-	0,194
4	29	0,725	0,092	0,285
5	28	0,7	0,086	0,371
6	35	0,875	0,139	0,51
7	-	-	-	0,51

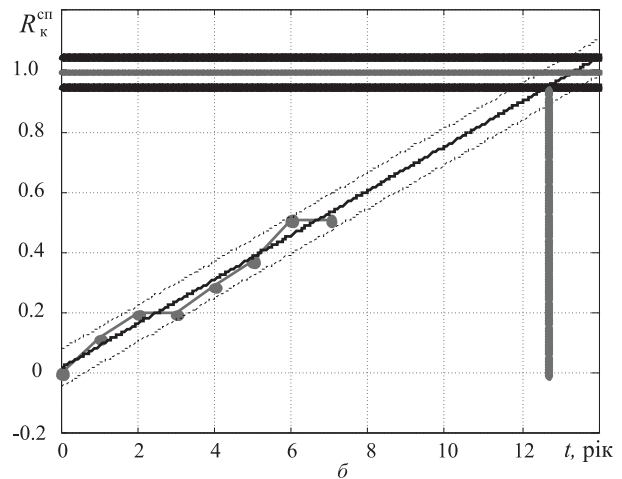
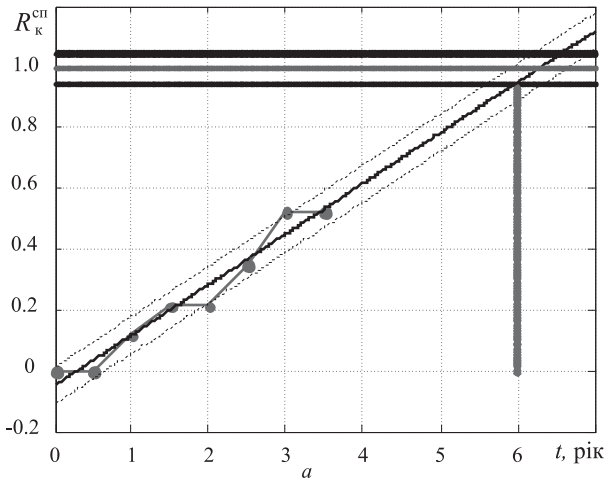


Рис. 1. Динаміка спрацювання і прогноз комутаційного ресурсу високовольтних вимикачів: а – ВНВ-330; б – ВГУ-110

— операція еквівалентності нечітких множин $\tilde{R}_{к.гр}^{сп}, \tilde{R}_{к}^{сп}$.

$$\tilde{R}_{к.гр}^{сп} \leftrightarrow \tilde{R}_{к}^{сп} = \min(\max(1 - \tilde{R}_{к.гр}^{сп}, \tilde{R}_{к}^{сп}), \max(1 - \tilde{R}_{к}^{сп}, \tilde{R}_{к.гр}^{сп}))$$

Нечіткі множини нечітко рівні $\tilde{R}_{к.гр}^{сп} \approx \tilde{R}_{к}^{сп}$, коли $\mu(\tilde{R}_{к.гр}^{сп}, \tilde{R}_{к}^{сп}) > \alpha$ (α задається експертним шляхом, часто $\alpha = 0,5$).

Для відпрацювання і підтвердження адекватності розроблених моделей прогнозування змінення комутаційного ресурсу високовольтних вимикачів за допомогою нечітких прогнозних моделей, на основі вимірних параметрів КЗ в фіксовані терміни міжремонтного періоду експлуатації вимикачів типу ВНВ-330-63/1350 і ВГУ-110-40/2000 були проведені розрахунки, які включали: вибір відповідного типу функції тренду змінювання комутаційного ресурсу та ідентифікацію параметрів апроксимуючої функції.

Значення коматованих вимикачами струмів і величини спрацьованого ресурсу вимикачів в моменти часу спостереження наведені у Табл. 1 та 2.

Для існуючих апроксимуючих функцій

(лінійна, квадратична, степенева тощо) з використанням методу найменших квадратів було виконано розрахунок параметрів апроксимуючих кривих в програмному середовищі Matlab R2010a. Проведені розрахунки показали, що найбільш прийнятною апроксимуючою функцією, яка дає найменшу помилку регресії даних, є лінійна функція типу $R_{к}(t) = b + a t$.

Ілюстрація динаміки змінення комутаційних ресурсів вимикачів ВНВ-330 і ВГУ-110 та моментів їх вичерпання показано на Рис. 1. За результатами прогнозування можна зробити висновок, що для вимикача ВНВ-330 вичерпання комутаційного ресурсу відбудеться через термін $t = 5,9$ років експлуатації після введення в роботу, або чергового капітального ремонту, який менший ніж регламентована періодичність капітальних ремонтів вимикача (складає 6 років для повітряних вимикачів).

Для вимикача ВГУ-110 вичерпання комутаційного ресурсу відбудеться через термін $t = 12,64$ роки, який, навпаки, є більшим, ніж нормативна періодичність планових капітальних ремонтів (10 років).



Висновки

1. Забезпечення надійності функціонування електричних станцій (ГЕС, ГАЕС) ЕЕС потребує ефективного контролю стану і визначення спрацьованого та залишкового комутаційного ресурсу високовольтних вимикачів.

2. В умовах значної невизначеності моменту появи та величини струмів КЗ, визначення прогнозованого залишкового ресурсу вимикача доцільно здійснювати з використанням теорії нечітких часових рядів.

3. Розроблено математичне і програмне забезпечення дозволяє прогнозувати термін вичерпання комутаційного ресурсу і, таким чином планувати терміни ремонтних робіт.

4. Остаточне рішення щодо визначення терміну спрацювання комутаційного ресурсу вимикача повинно прийматися на основі результатів прогнозування, одержаних з використанням різних існуючих методик і моделей.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Грабко В.В., Мокін Б.І.* Моделі та системи технічної діагностики високовольтних вимикачів. – Вінниця: УНІВЕЗСУМ– Вінниця, 1999. – 74 с.
2. *Афанасьев В.Н.* Анализ временных рядов и прогнозирование. – М.: Финансы статистика, 2001. – 288 с.
3. *Кильдишев Г.С.* Анализ временных рядов и прогнозирование. – М.: Статистика, 1973.
4. *Штовба С.Д.* Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 288 с.
5. *Назарычев А.Н., Андреев Д.А.* Методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования. – Иваново: ИГЭУ, 2005. – 224 с.
6. *Абдурахманов А.М., Мисриханов М.Ш., Неклепаев Б.Н., Шуртов А.В.* Еще раз о составляющих модели отказа выключателя // Электрические станции. – 2005. – № 4. – С. 41-48.
7. *Андреев Д.А., Назарычев Д.А.* Анализ методов оценки коммутационного ресурса высоковольтных выключателей // Вестник ИГЭИ. – 2008. – Вып.5. – С. 1-15
8. *Неклепаев Б.Н., Восросабин А.А.* Методика оценки коммутационного ресурса выключателей при эксплуатации // Промышленная энергетика. – 1995. – № 1. – С. 28-35
9. *Методические указания по определению расхода коммутационного ресурса выключателей при эксплуатации.* – М.: ОРГЭС, 1992.
10. *Бардик Є. І., Костерев М.В., Літвінов В.В.* Нечітке моделювання технічного стану високовольтних вимикачів енергосистем. // НТУУ "КПІ", міжнародний науково-технічний журнал "Наукові вісті". – 2011. – № 1. – С. 3-10.
11. *Мелихов А.Н., Бернштейн Л.С.* Ситуационные совету-

© Бардик Є.І., 2011

