

ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ

*Рубаненко Олександр Євгенійович к.т.н., доцент
Вінницького національного технічного університету*

*Рубаненко Олена Олександрівна к.т.н., доцент
Вінницького національного аграрного університету*

Rubanenko O.

Vinnitsa National Technical University

Rubanenko O.

Vinnitsia National Agrarian University

Анотація: розглянутий в статті метод визначення поточного ресурсу вимірювальних трансформаторів напруги ґрунтується на результатах, як поточних вимірювань деяких з діагностичних параметрів, так і на результатах раніше проведених вимірювань інших діагностичних параметрів (інколи понад рік назад). Запропоновано ресурс визначати оцінюючи значення коефіцієнта залишкового ресурсу, який змінюється в процесі експлуатації від одиниці до нуля та вимірюється у відносних одиницях. Доведено, що використання математичного апарату нечіткого моделювання, математичної статистики, врахування особливостей конструкції, умов експлуатації, результатів аналізу пошкоджень, думки експертів відносно оцінювання технічного стану досліджуваних трансформаторів напруги, зменшує похибку визначення технічного стану в умовах неповноти даних про значення діагностичних параметрів на момент визначення технічного стану.

Ключові слова: вимірювальний високовольтний трансформатор напруги, оперативне діагностування, пошкоджуваність, діагностичні параметри, прогнозування ресурсу, коефіцієнт залишкового ресурсу.

Вступ

В наш час велика увага приділяється питанням підвищення енергоефективності. Відомо [1], що за 4 місяці 2016 року загальні технологічні витрати електроенергії на її транспортування електричними мережами Міненерговугілля всіх класів напруг склали 5,9 млрд. кВт·г або 11,9% від загального відпуску електроенергії в мережу. У порівнянні із аналогічним періодом 2015 р. відбулося їх зменшення на 0,4 млрд. кВт·г). Понаднормативна (нетехнічна) складова технологічних витрат електроенергії за чотири місяці 2016 року по Міненерговугілля склала -0,9 млрд. кВт·г або -1,9% від загального відпуску електроенергії в мережу (-1,04 млрд. кВт·г або -1,9% у минулому році)

Важливу роль в підвищенні безпеки, надійності та ефективності енергетичного виробництва відіграють сучасні автоматичні та автоматизовані системи керування режимами електроенергетичних систем (ЕЕС), які реалізують концепції SMART Grids.

Широке впровадження методів та засобів інтелектуальної підтримки процесів прийняття оптимальних рішень підтверджує їх ефективність. Одним з напрямків підвищення ефективності транспортування електроенергії є вдосконалення методів та засобів зменшення втрат активної потужності за умов підтримання надійної експлуатації високовольтного обладнання в тому числі і застарілого.

В будь-який момент часу енергосистема знаходиться у стані, який визначається його параметрами. Сукупність станів енергосистеми і процесів переходу з одного стану в інший є її режимом, який характеризується параметрами, наприклад, електричними: напругами та навантаженнями підстанцій, струмами в лініях електропередач (ЛЕП), коефіцієнтами трансформації трансформаторів і т.п. Нормальна робота енергосистем можлива лише за умови чітко функціонуючої системи оперативно-диспетчерського керування режимами ЕЕС. Сучасні технології оптимального керування, передбачають вдосконалення методів та засобів їх інформаційної підтримки. Концепція SMART Grids передбачає широке впровадження енергозберігаючих технологій в умовах експлуатації застарілого обладнання.

Jakushokas, R. Power запропонована методика зменшення падіння напруги в окремих частинах розподільних мереж, однак вона не враховує технічний стан пристроїв регулювання [2]. Tirupathi Reddy [3] розглядає, на прикладі електричних мереж в Індії, статистику підвищення значення потужності, яка передається в електричній мережі. Доведено, що таке підвищення призводить до перевантаження деяких ЛЕП, до швидкого старіння обладнання високовольтного обладнання, до небажаного швидкого зменшення залишкового ресурсу обладнання, до відмови обладнання. Як результат, зростає тривалість та вартість ремонтів пошкодженого обладнання та



збільшуються втрати потужності у вітках схеми електричних систем, які на час ремонту працюють в неоптимальних режимах. Стверджується, що для підвищення надійності мережі та ефективності передавання енергії необхідно використовувати силові трансформатори, оснащені пристроями регулювання напруги під навантаженням та автоматичні або автоматизовані системи керування такими пристроями РПН, які б контролювали потоки потужності у вітках схеми та керували РПН таким чином, щоб параметри режимів електричних мереж знаходились в межах технічних параметрів обладнання (ЛЕП, комутаційних апаратів, трансформаторів та ін.). Це забезпечується використанням FACTS технологій. Отже актуальними задачами які стоять перед є контроль параметрів електричних мереж і насамперед напруг та контроль поточного стану вимірювальних трансформаторів напруги.

Автоматизація процесу керування перетіканням потужності може бути забезпечена шляхом централізованого дистанційного керованого почергового використання перемикальних пристроїв трансформаторів. За таких умов з'являється можливість аналізу ефективності керуючих впливів окремих РПН на режимні параметри ЕЕС шляхом зворотного зв'язку, який передбачає результатів контролю напруг на шинах підстанцій. Для цього використовуються трансформатори напруги. Цей підхід підвищує якість функціонування адаптивних керуючих автоматичних систем керування положенням РПН.

Реалізація заходів по зменшенню втрат потужності обмежується можливостями задіяного в забезпеченні оптимального режиму обладнання, а саме його технічним станом. Відомо, що пошкодження високовольтного обладнання під час керування режимами призводить до збитків, які значно перевищують вартість, заощадженої внаслідок зменшення втрат, електричної енергії. Пошкоджуваність застарілого високовольтного обладнання (силових трансформаторів, шунтуючих реакторів, вимірювальних трансформаторів струму і напруги, вимикачів і т.д.) зростає особливо тоді, коли таке обладнання знаходиться в експлуатації понад 25 років. Враховуючи те, що керування режимами електроенергетичних систем ЕЕС супроводжується роботою комутаційних апаратів, регулювальних пристроїв трансформаторів, комутаційними перенапругами, ферорезонансами, зростанням струмів в силових та вимірювальних трансформаторах, в лініях електропередач і т.п., то керування режимами потрібно здійснювати з урахуванням їх технічного стану та можливих витрат на їх заміну чи ремонт [4].

Високовольтні вимірювальні трансформатори напруги (ВВТН) відіграють важливу роль в інформаційному забезпеченні сучасного SMART обладнання (систем обліку електричної енергії, релейного захисту та автоматики і т. п.) ЕЕС та енергетичних компаній України.

Дослідження пошкоджуваності ВВТН

Відомі такі причини пошкодження ВВТН, як: пробій основної ізоляції, внаслідок зволоження, однієї із обмоток з подальшим переходом ВВТН в режим к.з. та пошкодженням (розвивається, як правило довго (кілька місяців). Виявляються такі пошкодження при аналізах масла на пробивну напругу, вологовміст, $\tan \delta$, може виявити хроматографія); пробій виткової ізоляції обмотки з подальшим переходом в режим к.з. та пошкодженням ВВТН внаслідок зволоження або заводського дефекту (дефект швидко розвивається у пошкодження за кілька годин, а то і хвилин), такі пошкодження можна виявити по хроматографії та по зростанню величини $3U_0$ вище $3V$, під час зростання $3U_0$ огляд ТН небезпечний так як може вибухнути влюбий момент; пробій виткової або основної ізоляції обмотки внаслідок ферорезонансних явищ з подальшим переходом в режим к.з. та пошкодженням ТН (при виникненні ферорезонансних явищ), дефект швидко розвивається у пошкодження (за кілька годин, а то і хвилин), таке пошкодження може виявити хроматографія; пошкодження заліза магнітопроводів, внаслідок виникнення замкнутих контурів в наслідок заводського дефекту або роботи в аварійному режимі (перевантаження по струму внаслідок роботи при підвищеній напрузі або при недопустимому навантаженні, може виявити хроматографія та визначення температури спалаху на пізній стадії); комбіноване пошкодження ізоляції обмоток та заліза магнітопроводу при систематичному попаданні води на обмотку та магнітопровід (розвивається, як правило довго (кілька місяців), виявляється при аналізах масла на пробивну напругу, вологовміст, $\tan \delta$, може виявити хроматографія); порушення контактного з'єднання обмоток, супроводжується появою $3U_0$ на одному із комплектів ВВТН (як правило нестійким, можливі звукові удари – дефект може проявлятися кілька днів і в принципі може привести до пошкодження ВВТН від перенапруг).

Об'єм випробувань ВВТН після ремонту: - контроль ізоляції обмоток; вимірювання омичного опору; перевірка полярності виводів; вимірювання холостого (неробочого) ходу кожного каскаду; вимірювання потужності холостого ходу зібраної фази при збудженні по НН; контроль холостого



ходу зібраної фази при збудження по ВН із вимірюванням коефіцієнта трансформації $K_{тр}$; аналізу масла до заливання та після заливання при відстоюванні в кілька днів та хроматографії після вимірів холостого ходу.

Незважаючи на планову заміну ВВТН, які пропрацювали понад 25 років (що перевищує їх паспортний ресурс), на нові, наприклад, елегазові, мають місце їх пошкодження (рис. 1).

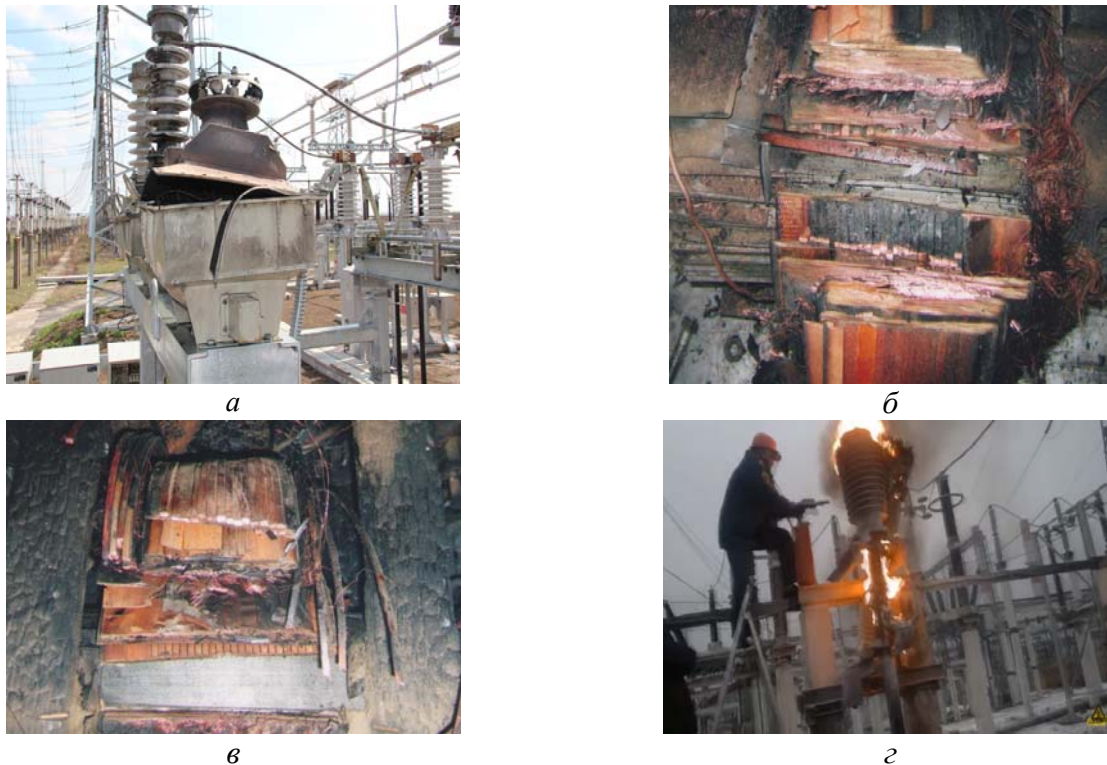


Рис. 1. Пошкодження ВВТН: а) 35 кВ (аварія 2015, виготовлення 2014 рік), б), в) 330 кВ, г) 110 кВ

З метою вчасного виявлення дефектів ВВТН, особливо на ранній стадії їх розвитку, проводиться комплекс заходів, який передбачає: постійний моніторинг діагностичних параметрів, таких наприклад, як комплексний опір (КІН-750), тангенс кута діелектричних втрат і т. п.; періодичні вимірювання діагностичних параметрів та випробовування. Отже актуальною постає задача вдосконалення методів та засобів визначення поточного стану ВВТН під час оперативного керування режимами ЕЕС – оперативного діагностування. Проблема полягає в неповноті початкових даних, необхідних для формулювання діагнозу. Частина даних про значення діагностичних параметрів є результатом періодичних випробовувань, які є застарілими на момент оперативних дій, інша – характеризує поточний стан, але лише окремих вузлів ВВТН (наприклад, стан паперово-оливної ізоляції). Перспективним, за таких умов, є визначення поточного залишкового ресурсу ВВТН методами нечіткого моделювання (МНМ) з метою подальшого його врахування під час оперативного керування режимами ЕЕС.

Результати досліджень

Розглянемо можливість використання (МНМ) на прикладі ВВТН НКФ-330.

Якщо в результаті аналізу статистичних даних з пошкоджуваності НКФ-330 (по фазно) в досліджуваній ЕЕС було виявлено проведення ремонтних, або профілактичних заходів, або заміни ВВТН, викликані понад нормованими значеннями, на протязі аналізовано періоду (наприклад, останніх 10 років)) таких параметрів, як (потужність втрат холостого ходу (1 випадок), активний опір ізоляції вторинних кіл (5 випадків), вміст вологи в трансформаторній оливі (ТО) (42 випадки), пробивна напруга ТО (31 випадків), $\text{tg}(\delta)$ ТО (3 випадки), механічні домішки (5 випадки), напруга нульової послідовності в групі однофазних трансформаторів (4 випадки), розгерметизація з підтіканням трансформаторної оливи (2 випадок), вміст розчинених газів (метан, водень) – 1 випадок, за іншими діагностичними параметрами відхилень від нормативних показників не було виявлено, то для аналізованої групи (схожих за умовами експлуатації ВВТН), пропонується в першій групі діагностичних показників визначати їх вагові коефіцієнти за статистикою виявлених відмов за місцем



експлуатації, в другій групі – відповідно статистики відомих пошкоджень в інших ЕЕС (за наявності таких відомостей).

З метою отримання узагальненого показника залишкового ресурсу ВУ, який вираховує значення всіх діагностичних параметрів та їх вплив, пропонується від відомих значень діагностичних параметрів перейти до відповідних цим значенням коефіцієнтів залишкових ресурсів по кожному діагностичному параметру. Ці коефіцієнти визначаються у відносних одиницях за виразом і тому характеризують сумарне напруження ВУ від моменту контролю його технічного стану до переходу у граничний стан, коли діагностичний параметр досягає граничного значення, тобто залишковий технічний ресурс. Коефіцієнт залишкового ресурсу k_i за i -м діагностичним параметром:

$$k_{i1} = \left| \frac{x_{i1,гран} - x_{i1,ном}}{x_{i1,гран} - x_{i1,поч}} \right|, \quad (1)$$

де $x_{i1,гран}$ – граничне нормативне значення i_1 -го діагностичного параметра, $x_{i1,ном}$ – значення i_1 -го діагностичного параметра на момент контролю, $x_{i1,поч}$ – початкове значення i_1 -го діагностичного параметра (на момент введення в експлуатацію нового обладнання або після ремонту), i_1 – діагностичний параметр.

Так, якщо параметр $tg(\delta)$ трансформаторного масла, яке знаходиться в ВВТН НКФ-330 після ремонту дорівнював 0,8 %, а на момент контролю дорівнював 1,0 %, а граничне значення цього параметра – 10,0 %, то коефіцієнт залишкового ресурсу $k_{tg(\delta)}$ за діагностичним параметром $tg(\delta)$ визначається за виразом (4):

$$k_{tg(\delta)} = \left| \frac{10.0 - 1.0}{10.0 - 0.8} \right| = 0.978 \text{ (в.о.)}. \quad (2)$$

Враховуючи можливу зміну діагностичних параметрів в процесі експлуатації формується масив навчальних даних нечіткої моделі в якому кожній сукупності можливих значень діагностичних параметрів надається у відповідність значення коефіцієнта залишкового ресурсу ВВТН. Цей масив даних перевіряється експертами (представниками заводу-виробника, ремонтних та експлуатуючих організацій), зіставляється з результатами контролю та випробовувань, корегується та редагується. Навчається модель нечіткого висновку (значення коефіцієнта залишкового ресурсу) за алгоритмом Sugeno [5], перевіряється на контрольній вибірці та ще раз редагується. Очікується, що отримана модель дозволить оперативному персоналу оцінити поточний стан ВВТН, можливість її подальшої експлуатації, особливо в умовах комутаційних та грозових перенапруг.

Висновки

Залишковий ресурс можна визначати оцінюючи значення коефіцієнта залишкового ресурсу, який змінюється в процесі експлуатації від одиниці до нуля та вимірюється у відносних одиницях.

Використання математичного апарату нечіткого моделювання, математичної статистики, врахування особливостей конструкції, умов експлуатації, результатів аналізу пошкоджень, думки експертів відносно оцінювання технічного стану досліджуваних трансформаторів напруги, зменшує похибку визначення технічного стану в умовах неповноти даних про значення діагностичних параметрів.

Список літератури

1. Дупак О.С. Про основні показники паливно-енергетичного комплексу за січень-травень 2016 року / О.С. Дупак // *Енергоінформ-Інформенерго*. – 2016. – №509. – С.3–13.
2. Reddy Tirupathi, Gulati Aruna, Khan, M. I., Koul Ramesh, *Application of Phase Shifting Transformer in Indian Power System, International Journal of Computer and Electrical Engineering*. 2012, Vol. 4, Issue 2, pp. 242–245.
3. Kolcun, M., Hlubenč, D., Beň, L., Djagarov, N., Grozdev, Z., *Transformer use for active power flow control in the electric power system, Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2010 9th International Conference on*. 2010, pp. 246–249.
4. Buslavets O. *Evaluation and increase of load capacity of on-load tap changing transformers for improvement of their regulating possibilities* / O. Buslavets, P. Lezhniuk, O. Rubanenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2015. – №2/8(74). – pp. P. 35–41
5. Костерев М.В. *Проблеми побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем: Монографія* / М.В. Костерев, Є.І. Бардик – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 148 с.

References

1. Dupak A.S. *Ob osnovnykh pokazatelyakh toplivno-energeticheskogo kompleksa za yanvar'- may 2016* / O.S.



Dupak // Yenergoinform - Informenergo . 2016. - №509 . - S.3-13 .

2. Reddy Tirupathi, Gulati Aruna, Khan, M. I., Koul Ramesh, Application of Phase Shifting Transformer in Indian Power System, International Journal of Computer and Electrical Engineering. 2012, Vol. 4, Issue 2, pp. 242–245.

3. Kolcun, M., Hlubeň, D., Beňá, L., Djagarov, N., Grozdev, Z., Transformer use for active power flow control in the electric power system, Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2010 9th International Conference on. 2010, pp. 246–249.

4. Buslavets O. Evaluation and increase of load capacity of on-load tap changing transformers for improvement of their regulating possibilities / O. Buslavets, P. Lezhniuk, O. Rubanenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – №2/8(74). – pp. P. 35–41.

5. Kosteryev M.V. Pytannya pobudova nechitkikh modeley OTSINKY tekhnichnoho stanu ob'yektiv elektrychnykh system : Monohrafiya / M.V. Kosteryev , YE.I. Bardyk. – K. : NTUU « KPI », 2011. –148 s

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Аннотация: рассмотренный в статье метод определения текущего ресурса измерительных трансформаторов напряжения основывается на результатах, как текущих измерений некоторых из диагностических параметров, так и на результатах ранее проведенных измерений других диагностических параметров (иногда более года назад). Предложено определять ресурс оценивая значение коэффициента остаточного ресурса, который изменяется в процессе эксплуатации от единицы до нуля и измеряется в относительных единицах. Доказано, что использование математического аппарата нечеткого моделирования, математической статистики, учета особенностей конструкции, условий эксплуатации, результатов анализа повреждений, мнения экспертов относительно оценки технического состояния исследуемых трансформаторов напряжения, уменьшает погрешность определения технического состояния в условиях неполноты данных о значении диагностических параметров на момент определения технического состояния.

Ключевые слова: измерительный высоковольтный трансформатор напряжения, оперативное диагностирование, повреждаемость, диагностические параметры, прогнозирование ресурса., коэффициент остаточного ресурса.

FORECASTING VOLTAGE TRANSFORMERS RESOURCES

Summary: considered in the paper a comprehensive method for determining the current location of the resource-foot measuring voltage transformers based on the re-sults as current measurements of some of the diagnostic parameters and the results of earlier measurements of other diagnostic parameters (sometimes more than a year ago). A resource to determine values of assessing the residual life that changes in the operation of the unit to zero and is measured in relative units. It is proved that the use of mathematical apparatus of fuzzy modeling, mathematical statistics, taking into account design features, the operating environment of the analysis of damages expert opinion regarding the evaluation of technical condition of the studied voltage transformers, reduces error in determining the technical state under conditions of incomplete data on the value of diagnostic parameters at the time of determination of the technical state.

Keywords: keasuring high-voltage transformer on-streak, prompt diagnosis damageability, diagnostic parameters, predicting resource, coefficient of residual life.