УДК 621.316.5 DOI: http://doi.org/10.15407/techned2018.02.075

АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ МОНІТОРИНГУ І ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ

А.В. Панов, В.І. Паньків, М.Ф. Сопель, докт.техн.наук, **Б.С. Стогній***, акад. НАН України,
Є. М. Танкевич**, докт.техн.наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: av-panov@ukr.net

Визначено фактори, які зумовлюють необхідність зміни стратегії технічного обслуговування високовольтних вимикачів енергосистем − поступового переходу від періодичного обслуговування до обслуговування на основі оцінювання технічного стану вимикача та його надійності. Показано, що найважливішою умовою впровадження прогресивних систем технічного обслуговування і керування технічним станом цього надто відповідального електричного обладнання енергосистем є побудова систем його on-line моніторингу. Виявлено і вивчено актуальні питання побудови таких систем, серед яких найважливішим визнано розробку, вибір і наукове обґрунтування ефективних методів обробки та аналізу сигналів різного роду давачів інформації про технічний стан вимикачів. Бібл. 51, табл. 1.
Ключові слова: високовольтний вимикач, технічне обслуговування, стратегія, моніторинг, сигнал, методи обробки.

Вступ. Високовольтні вимикачі (ВВ) як один з основних компонентів передачі "генерація-споживання електричної енергії" відіграють визначальну роль у забезпеченні надійного та безпечного функціонування електроенергетичних систем (ЕЕС) у нормальних та аварійних умовах їхньої експлуатації. Вони використовуються для конфігурування ЕЕС і керування потоками електроенергії, відключення пошкоджених частин ЕЕС і обмеження розвитку подальших аварій.

Через знос та старіння, що відбуваються в процесі експлуатації, вплив робочих струмів у різних режимах ЕЕС та вплив навколишнього середовища, неякісне чи несвоєчасне технічне обслуговування (ТО) в цьому надто складному за конструкцією обладнанні виникають різного роду пошкодження. ВВ є складним за своєю конструкцією механіко-електричним обладнанням. Сукупна кумулятивна дія зазначених факторів спричиняє ослаблення механічних кріплень, погіршення ізоляційних властивостей, поломки котушки вмикання/вимикання, ерозію та (або) поломки основних контактів, воронки і розширення сопел дугогасних камер та інші пошкодження. Це призводить до зниження робочих характеристик та надійності вимикачів, що з часом може стати причиною повної відмови у виконанні ними своїх функцій, зменшення строку служби і передчасного виведення з експлуатації.

Згідно з даними, отриманими від енергопостачальних компаній різних країн та організацій, які досліджують статистики відмов вимикачів [14,26,37,39], приблизно (50−60)% з них відбуваються через пошкодження в механічній частині вимикачів, (20−30)% пов’язані з їх колами керування, (20-30)% − електричної та діелектричної природи і стосуються контактної системи та дугогасної камери вимикачів.

Причинами погіршення стану робочого механізму чи механічного пошкодження вимикача може бути старіння матеріалів і зміна робочого ходу штока (плунжера) котушки вмикання/вимикання, зношення поверхні та недостатнє змащування замкового з’єднання, розпад підшипників, застосування дешевих місцевих замінників консистентних мастил, відмова механізму зв’язку між приводним механізмом та переривником, пошкодження важелів основних контактів, поломка пружин, неправильне розміщення нагрівачів та ін. [14]. До причин виникнення інших можливих механічних пошкоджень, що складають близько третини від усіх, належать недостатня кваліфікація персоналу (помилкові налаштування, перекручування гвинтів), помилки проектування чи виготовлення (корозія фланців, тріщини корпусу) [26, 29].

Основними причинами аварій, пов’язаних із втратою ізоляційних характеристик вимикача, є пошкодження фарфору, ущільнювачів та прокладок, розгерметизація ізолюючого середовища, втрата тиску газу (повітря, елегазу), надмірна температура газу, відмова регулюючого клапана тиску повітря (для повітряних ВВ), надмірна вологість і зменшена щільність елегазу. Згідно з [28] 38% пошкоджень електричної та діелектричної природи елегазових вимикачів спричинені витоком елегазу, включно і через ущільнення валу приводу [14].

© Панов А.В., Паньків В.І., Сопель М.Ф., Стогній Б.С., Танкевич Є.М., 2018
ORCID ID: * https://orcid.org/0000-0001-9651-4177 ; ** https://orcid.org/0000-0002-0869-4049

До пошкоджень кіл управління належать можливі обрив кола або поява короткого замикання в колі котушки вмикання/вимикання, несправність котушок, втрата або недостатній рівень напруги живлення, відмова кіл релейного захисту. У випадку використання пружинних приводів можливе недостатнє або надмірне накопичення енергії або зношування спускового механізму пружини. У випадку застосування гідравлічного приводу − втрата накопиченої енергії, надмірний тиск у системі пневматичних або гідравлічних рідин.

Тривала експлуатація вимикача може спричиняти недостатнє розходження основних контактів, що також є однією з причин погіршення ізоляційних характеристик, а термічна дія електричної дуги, яка виникає в процесі вмикання/вимикання, призводить до таких наслідків, як вигоряння основних контактів, збільшення опору контактного з'єднання [29].

Перелічені пошкодження та відмови складових вимикача, які забезпечують його функціонування, можуть призводити до таких наслідків, як: неможливість розірвання кола задля переривання струму; ненавмисного замикання кола; розривання кола, коли від вимикача це не очікується; неможливість замкнути коло, коли від нього це очікується. Як правило, такі наслідки зумовлюють проблеми економічного та безпекового характеру. Зокрема, для прикладу, втрати Китаю, зумовлені пошкодженнями ВВ протягом 1984−1994 рр., за статистичними даними складають мільйон кВт·год і в тисячу разів перевищують вартість самих вимикачів [7, 8]. Це свідчить про те, що надійність і працездатність вимикачів може бути виражена кількісною оцінкою вартості їхньої роботи.

Потрібний і достатній рівень надійності вимикачів в експлуатації забезпечується їхнім ТО. Однак, як витікає з наведеного вище, існуюча система ТО не завжди виявляється ефективною і тому потребує суттєвого вдосконалення. Важлива роль ВВ у надійній роботі ЕЕС, значна кількість факторів впливу на їхнє функціонування, а відповідно велика кількість можливих пошкоджень та відмов, а також великі витрати на неефективне ТО виправдовують необхідність вдосконалення системи ТО цього надто відповідального обладнання. Цінним внеском у розв'язання цієї актуальної задачі може стати здійснення комплексного моніторингу вимикачів і створення на цій основі ефективної системи їхнього ТО, що забезпечить оптимізацію строку служби та підвищення надійності функціонування ВВ.

Метою роботи є визначення на основі аналітичного огляду закордонних і вітчизняних публікацій актуальних задач розробки, побудови і впровадження сучасної системи комплексного *on-line* моніторингу стану ВВ, здатної здійснювати моніторинг стану критичних елементів вимикачів, фіксувати погіршення їхніх робочих характеристик і попереджати про можливу відмову в процесі експлуатації.

Стратегії технічного обслуговування вимикачів. Нормативна база. Регулярний огляд та ТО ВВ є важливою і невід'ємною складовою експлуатації цього обладнання. Періодичне ТО вимикачів (за розкладом), яке в світовій практиці відоме як Time Based Maintenance (TBM), відбувається на основі фіксованих інтервалів часу чи обліку числа виконаних операцій вимикачем. Така стратегія ТО є традиційною для значної кількості країн [2], включно й України [12, 13]. TBM має багато недоліків, серед яких необхідність виведення ВВ з експлуатації, значна вартість та витрата часу, можливе надмірне ТО або ж його недостача. Нерідко після TBM задовільно працюючого вимикача також можливі його відмови, пов'язані з втручанням некваліфікованого обслуговуючого персоналу. За умов дерегуляції в електроенергетиці, жорсткої конкуренції на ринку електроенергії така практика ТО виявилася економічно мало життєздатною, оскільки майже не дає можливостей для оптимізації використання обмежених ресурсів на проведення ТО. Через вказані недоліки TBM у світовій практиці відбувається поступовий перехід до ТО на основі оцінювання технічного стану ВВ (Condition Based Maintenance, CBM) та надійності ВВ (Reliabilite Based Maintenance, RCM) [2].

CBM або прогнозоване ТО вимагає, як правило, виведення ВВ з експлуатації для проведення ряду діагностичних тестів із метою встановлення поточних характеристик та параметрів вимикача. На основі результатів цих спостережень (зібраної інформації), які обов'язково порівнюються зі спостереженнями «першого вмикання/вимикання», приймається рішення про терміни та види подальшого ТО, що забезпечує краще використання коштів і виконання послуг з ТО. CBM, представляючи собою прообраз нової інформаційної технології, є більш практичним і ефективним для ВВ. Однак використання усієї отриманої інформації вимагає від її користувача певного рівня знань, відсутність яких може призвести до некоректного оцінювання технічного стану (ТС) вимикача, особливо аварійного. Тому неправильне тлумачення результатів спостережень може стати причиною непотрібного ТО і пов'язаного з цим зростанням витрат.

Додаткова проблема CBM, особливо для ОЕС України, пов'язана з відсутністю відповідної сучасної нормативної бази, яка б чітко регламентувала порядок дій, перелік діагностичних тестів та ін-

формації, яку потрібно зібрати під час проведення ТО. Через це обслуговуючі компанії використовують різноманітне обладнання та різні діагностичні тести для отримання потрібних характеристик та параметрів. До загального, усталеного переліку таких тестів при виконанні СВМ належать вимірювання динамічного опору руху контактів, опору котушки вмикання/вимикання, кута діелектричних втрат зрівнювальних конденсаторів, опору фарфорового ізолятора, тести мінімальної напруги живлення котушки, синхронності операцій вмикання/вимикання фазних вимикачів, визначення стану діелектрика, а також запис та аналіз кривої руху основних контактів, струмів котушки вмикання/вимикання, струму привідного механізму [2, 26]. Можливе проведення додаткових діагностичних тестів, які передбачають аналіз вібраційних [33] чи акустичних [20] сигналів, отриманих у процесі вмикання/вимикання та ін.

RCM є найскладнішою і найбільш повноцінною стратегією ТО, що ґрунтується на аналізі наслідків відмов та пошкоджень, їх ймовірності та витрат коштів на ТО [2]. Під час RCM здійснюється детальна оцінка ризиків відмов і відмов вузлів. Потенційні види відмов мають власний пріоритет відповідно до ризику їхнього виникнення та наслідків. RCM може застосовуватися як до самого вимикача (як складної структури) [47], так і до ВВ у сукупності з іншим обладнанням підстанції [30] та (або) з системою моніторингу ТС вимикача [15].

Одним із інструментів, який може забезпечити значний внесок у стратегії ТО, особливо СВМ та RCM, є неперервний on-line моніторинг (локальний, віддалений, централізований) параметрів та стану ВВ. Такий моніторинг забезпечує неперервну і одночасну фіксацію значної кількості змін у часі багатьох процесів, характеристик і параметрів вимикача та їхнє порівняння з допустимими чи еталонними значеннями, що надає можливість оцінювання стану вимикачів без виведення їх з експлуатації, що є надто важливим, оскільки це значно покращує ефективність і економічність ТО.

Нормативно-правова база щодо створення та використання систем моніторингу (СМ) в Україні відсутня, але, незважаючи на це, на високовольтних підстанціях з метою моніторингу вимикачів встановлюється певне обладнання. Щодо нормативної бази міжнародного рівня, то найбільш цілеспрямованим, повним та корисним для розробників та користувачів СМ ВВ є керівництво IEEE Std.C37.10.1-2000 [24], яке необхідно використовувати в поєднанні зі стандартами [3,5,21−23,25]. У цьому досить глибоко дослідженому інформативному документі подано базовий перелік можливих характерних відмов вимикачів, їх причин і наслідків, характеристик розвитку відмов та доступних у кожному конкретному випадку опцій моніторингу. Представлені в керівництві декілька методологій вибору варіанту моніторингу враховують ризики відмов вимикачів та доцільність витрат при застосуванні моніторингу за умови найбільшого зменшення інтенсивності їхніх відмов. За допомогою оцінювання ризику відмов через оцінку їхньої ймовірності та серйозності наслідків визначається міра важливості відмов у сфері економіки, безпеки та навколишнього середовища. Для означення напрямків модернізації ТО (стратегії, задач та інтервалів) ВВ завдяки моніторингу подано приклади різних програм їхнього обслуговування за наявності та відсутності моніторингу.

Нижче з метою визначення актуальних питань побудови і перспективних напрямків вдосконалення СМ ВВ коротко подано результати огляду функціональних характеристик і можливостей вже впроваджених у світовій практиці систем.

Пристрої та системи моніторингу ВВ. Усі існуючі пристрої та СМ ВВ використовують сигнали різної фізичної природи, отримані від давачів, побудованих із використанням різних фізичних ефектів. Зібрані від давачів сигнали підлягають обробці та аналізу для визначення технічного стану чи комутаційного ресурсу вимикача. Дві з таких систем, а саме мікропроцесорні СМ і прогнозування залишкового ресурсу високовольтних елегазових [42] і повітряних [43] вимикачів розроблено і впроваджено в Україні. Серед закордонних розробок насамперед слід відзначити промислові зразки СМ ВВ таких всесвітньо відомих фірм, як Alstom [4] та Elcon [48].

Окремі відомості про закордонні прототипи таких систем наведені в працях [7,14,28,34,36,40]. Так, у [36] йдеться про систему on-line моніторингу елегазових ВВ, що здійснює контроль їхніх ізоляційних характеристик на підстанції 6,6 кВ. Обробка сигналів давачів щільності і вологості елегазу здійснюється з використанням вейвлет-перетворення і емпіричної формули стану елегазу Біттi-Бріджмена. У [14] повідомляється про розробку пристрою on-line моніторингу механічного стану ВВ з пружинним приводом на основі контролю часових характеристик положення його основних контактів і їхнє порівняння із заздалегідь запрограмованими часовими проміжками. Пристрій також дозволяє відстежувати час заведення пружини і здійснювати перевірку функціональності демпфера. У [7] йдеться про систему тестування ТС ВВ, побудовану на основі використання ARM (Acorn Risc Machine) архітектури процесора. Система контролює швидкісні характеристики рухомого контакту і

струму котушки ввімкнення вимикача. Для обробки сигналів використано дискретні вейвлет-перетворення. Цікавим є пристрій, розроблений на основі комбінації чіпів з архітектурами ARM та FPGA (Field-Programmable Gate Array) [34]. FPGA використовуються для запису та обробки струмів соленоїдів ввімкнення/вимкнення, струму приводу та вібраційних сигналів, тоді як ARM – для фіксації стану заземлення, положення ввімкнено/вимкнено, запасу енергії приводу і для керування перемиканнями. Дані з обох чіпів збираються і обробляються за допомогою методу розкладання на емпіричні моди. Результати розкладу аналізуються за допомогою теорії нечіткої логіки та методу опорних векторів для прийняття висновку про стан ВВ. У праці [40] для моніторингу стану вимикача розроблено прототип СМ, що складається з модуля збирання даних, вторинних перетворювачів, які отримують дані з трансформаторів струму та напруги, давачів тиску, температури та щільності елегазу і мікрокомп'ютера для збереження даних. Щодо обробки цих даних і отримання з них деяких параметрів з метою встановлення стану вимикача в праці не йдеться.

Огляд та аналіз існуючих розробок СМ ВВ показав, що для усіх них характерним є реалізація лише певної обмеженої кількості моніторингових процедур, контроль незначної кількості параметрів, локальне використання лише окремих діагностичних ознак, методів фільтрації та обробки сигналів, тобто існує ще значна кількість областей моніторингу стану ВВ, які є мало дослідженими, а їхній вплив на якість та точність моніторингу стану вимикача практично не враховується. Виходячи з цього, нижче розглянуто актуальні питання, які необхідно вирішувати при створенні СМ ВВ.

Контрольовані при моніторингу елементи, процеси, фізичні величини та параметри вимикачів. Відповідно до визначених вище можливих видів пошкоджень та відмов вимикачів основними джерелами інформації про їхній стан є приводи, котушка вмикання/вимкнення, дугогасні камери, механічні кріплення, коло керування та внутрішнє середовище. Детальний перелік контрольованих елементів, процесів і фізичних величин високовольтних вимикачів наведено у таблиці.

Одне з найважливіших місць у моніторингу вимикачів посідає дослідження їхньої механіки. Ключовими компонентами в цьому є струми котушки вмикання/вимикання кожної з фаз і резервної. Встановлення кореляції параметрів цих струмів із характеристиками пошкоджень вимикача дозволяє використовувати їх як індикатори стану, виявляти і попереджувати такі можливі пошкодження приводів, як корозія і надмірне забруднення електромагнітів, неналежне змащення засувок, деформація контактів ланцюгів керування [14, 32, 37]. Моніторинг параметрів струму котушки вимкнення дозволяє контролювати час і швидкість вимкнення вимикача, тобто величин, що безпосередньо пов'язані з тривалістю гасіння дуги. Перевищення заданої уставки часу гасіння електричної дуги свідчить про розбалансованість механічної частини пневматичного дугогасного пристрою [41]. За характеристиками струму котушки вмикання/вимикання і часом дії допоміжних контактів можна в реальному часі точно встановити якість функціонування електромагнітів та стан робочого механізму вимикача.

Дані, отримані в результаті вимірювання і обробки кривої руху основних контактів в поєднанні з іншими параметрами, дають інформацію про механічне навантаження (удар) на амортизатор (буфер), стабільність руху контактів та вимикаючу спроможність вимикача. На ТС вимикача і його здатність до подальших дій вказують також електричний опір основного шляху струму, максимальний хід і максимальна швидкість рухомого контакту, час переривання головних (дугових) контактів (від подачі команди до з'єднання), час електричного розриву контактів.

Ерозія контактів, що супроводжується втратою їхньої маси і зміною форми, може бути причиною раннього виникнення дуги, збільшення часу її горіння та розмивання сопла, впливаючи таким чином на продуктивність вимикача [29].

Важливою інформацією про стан вимикача є гучний шум і вібрація під час його роботи [49]. Вібраційні та акустичні сигнали, згенеровані вимикачем впродовж операцій вмикання/вимикання, замикання/розмикання контактів у певній точці їхнього ходу, можуть вказати на зношення дугогасильних контактів, незадовільне демпфірування, послаблення механічних кріплень, основних болтів та розпірок, брак у змащуванні засувки, механічні залипання з'єднувальних елементів, зношення електромагніту [32, 33].

Моніторинг щільності, вмісту вологості та тиску елегазу, тобто параметрів, які характеризують ізоляційні властивості вимикача, дозволяє контролювати герметичність камери з елегазом і вплив вологи та продуктів розкладу газів на надійність, комутаційну здатність і термін його служби.

Об'єкт контролю	**Контрольований процес**	**Фізичні величини, характеристики процесу, параметри**
Пружинний привід	Заведення пружини Змащення засувки	Струм заведення пружини час заведення пружини число запусків двигуна форма кривої струму максимальне значення струму напруга живлення двигуна
Гідравлічний привід	Витік мастила	тиск
Котушки вмикання/вимкнення та допоміжні контакти	Струми котушок вмикання/вимкнення та положення допоміжних контактів	струм котушки час збудження час зменшення струму час відключення допоміжних контактів сумарний час подачі енергії час дії допоміжних контактів час дії експлуатаційних контактів перехідний час фіксації напруга живлення котушки повний опір котушки несинхронність перемикань безперервність кола форма струму котушки
Дугогасна камера	Іскріння контактів, зношення контактів, рух контактів, удар контактів, положення контактів, корозія контактів	швидкість руху контактів швидкість включення контактів час горіння дуги час відключення вимикача середній час відключення контактів середній час включення контактів час включення контактів час відключення контактів відстань опір контактів довжина електричного розриву опір металічних контактів опір дугового контакту довжина дугового контакту опір між рухомим і нерухомим контактами напруга на контактах
Механічні кріплення	Вібрація, удар, шум, рух	періодограма вібраційного або акустичного сигналу
Блок керування		час дії допоміжних контактів «а» час дії допоміжних контактів «б» час дії експлуатаційних контактів перехідний час фіксації
Ізоляційне середовище	Витік елегазу, зміна щільності і вологості елегазу	вологість щільність температура рівень витоку
Нагрівальні елементи	Нагрівання	струм тривалість

Як видно з таблиці, до переліку діагностичних параметрів входять параметри, що виражаються як електричними, так і неелектричними величинами, одержані в результаті вимірювань. Серед них є такі, що характеризують стан декількох вузлів чи деталей, і такі, що належать лише одній деталі, вузлу чи елементу. Взагалі існує надто велика кількість діагностичних параметрів (фізичних величин та параметрів структурних компонентів вимикачів) і відповідних їм діагностичних ознак, урахування яких при визначенні ТС вимикачів є однією з основних труднощів реалізації їх під час on-line моніторингу. Це і пояснює, чому сучасні теоретичні дослідження в галузі визначення ТС ВВ проводяться в декількох, не пов'язаних між собою напрямках, у кожному з яких розглядаються різні найуразливіші струк-

турні частини вимикача, різні їхні пошкодження та процеси, що їх супроводжують (діагностичні ознаки), і діагностичні параметри, за результатами моніторингу яких можна визначити ТС без виведення його з експлуатації та розбирання. Отже, визначення і обґрунтування оптимального набору діагностичних параметрів і границь їхньої зміни для конкретного типу вимикача, що забезпечить повноцінне визначення його ТС, є однією із актуальних задач побудови системи моніторингу ВВ і керування його ТС.

Методи обробки даних моніторингу та визначення технічного стану вимикачів. Велика кількість пошкоджень вимикачів, різних за характером, місцем знаходження, зумовлює необхідність контролю значної кількості їхніх елементів і окремих деталей, процесів, характеристик і фізичних параметрів. Процеси та сигнали, які підлягають аналізу під час визначення ТС вимикачів, дуже різняться своїми часовими та частотними характеристиками, містять значну кількість шумів електромагнітної, вібраційної та акустичної природи, джерелами яких є високовольтне обладнання електричної підстанції, в багатьох випадках для них характерні перепади, гострі піки, зміни у часі спектрального складу тощо. Зокрема, струм котушки вмикання/вимикання окрім інформації про механічний та електричний стан кіл управління вимикача містить електромагнітний шум із можливими раптовими імпульсами [8, 51]. Аналіз праць [6,9-11,16,20,32,35,45,46,50] свідчить про те, що у вібраційних сигналах, виміряних за допомогою акселерометрів за операцій вмикання/вимикання, міститься значна кількість вібраційного шуму, сила впливу якого на результат оцінювання механічного стану вимикача суттєво залежить від задіяних методів очищення вібраційного сигналу. У випадку використання акустичних сигналів, виміряних під час операцій вмикання/вимикання за допомогою мікрофонів ємнісного типу, вся якісна інформація про механічний стан вимикача знаходиться у діапазоні (500−3000) Гц, а енергія акустичного шуму в сигналі розподіляється в основному у діапазоні до 500 Гц [49]. Окрім шуму, спричиненого обладнанням високовольтної підстанції (внаслідок іонізації повітря високою напругою; згенерованого намагнічуванням магнітопроводів силових трансформаторів; створеного електричною дугою, особливо в аварійному режимі при розмиканні основних контактів вимикача), можлива присутність акустичного шуму, спричиненого такими природними явищами, як вітер чи гроза, що також дещо ускладнює процес моніторингу механічного стану вимикача. Присутність шуму в сигналі суттєво ускладнює і вносить похибки у визначення його інформативних параметрів (таблиця), які слугують діагностичними ознаками пошкоджень вимикача. З наведеного випливає, що необхідною умовою отримання якісної інформації про ТС вимикача є обов'язкове очищення виміряних сигналів від шуму.

Зазначені види шуму можна відфільтрувати шляхом застосування традиційних цифрових фільтрів [49] або, як показано у [8, 10, 35], застосуванням доволі нового та ефективного методу цифрової фільтрації, а саме вейвлет-розкладу сигналу із застосування методів м'якого або жорсткого порогового значення до отриманих у результаті його розкладу складових. Для фільтрації можливих у струмах котушки вмикання/вимикання імпульсів у роботі [51] запропоновано застосувати фільтр, який грунтується на базових операціях теорії математичної морфології – відкритті та закритті.

Після очищення сигналів від завад, наступним етапом є визначення інформативних (діагностичних) параметрів, які б дали можливість зробити висновок про наявність тих чи інших пошкоджень вимикача. Спектр сучасної методології та теорій у даному контексті є досить широким. Зокрема, у [49] запропоновано біспектральний аналіз та перетворення Гільберта-Хуанга. За словами авторів, завдяки застосуванню біспектрального аналізу до акустичного сигналу можна виявляти пошкодження амортизатора основних контактів вимикача, а також відмову пружинного приводу за умов недостатньо накопиченої енергії. Такі пошкодження та відмова характеризуються появою значної кількості додаткових пікових значень у плані біспектрального аналізу сигналу. Додатковим критерієм правильності зафіксованих пошкоджень автори пропонують застосовувати перетворення Гільберта-Хуанга, базиси якого визначаються в результаті застосування до сигналу емпіричної модової декомпозиції. Далі за допомогою перетворень Гільберта розраховуються усі необхідні миттєві параметри базисів сигналу, включно і миттєва частота, а також енергії та ентропії енергій кожного базису. Аналіз ентропії енергії базисів також дає можливість зафіксувати пошкодження і пересвідчитися у його наявності.

У роботі [6] перетворення Гільберта-Хуанга застосовано до вібраційних сигналів із метою встановлення наявності механічних пошкоджень ВВ, а також послаблення гвинтів кріплення ізолятора до фундаменту. Тут, подібно до [49], розраховуються значення ентропії енергії і будується часово-частотний план ентропії енергії. Сигналізатором наявності пошкоджень є зміна ентропій енергії відносно плану, а також плану ентропій енергії вимикача в нормальному робочому стані. Перетворення Гільберта також використано у роботі [20] для отримання аналітичного виразу вібраційного сигналу. До отриманого аналітичного сигналу застосовують миттєві вейвлет-перетворення (ВП), що поляга-

ють у розкладі сигналу в різних масштабах та визначенні миттєвих амплітуд та частоти кожного з елементів його вейвлет-розкладу. Згідно з твердженням авторів, таким методом легко визначати послаблення гвинтів кріплення ізолятора до фундаменту та послаблення фіксуючих розпірок. У [45] вібраційний сигнал пропонують розкладати за допомогою ВП із подальшим визначенням аналітичного сигналу кожної складової за допомогою перетворень Гільберта. Розраховуються миттєві амплітуди аналітичних сигналів, і сигнал ділиться вздовж осі часу на N частин. Для кожної частини миттєвої амплітуди всіх етапів вейвлет-розкладу визначаються характеристичні ентропії, які порівнюються з відповідними розрахованими значеннями нормального стану вимикача. Результат порівняння дає можливість зробити висновок про наявність механічних пошкоджень.

Для виявлення різних пошкоджень, таких як руйнування амортизатора, послаблення гвинтів, перехід буферної пружини за крайнє положення, брак мастила в замковому з'єднанні, пошкодження механізму з'єднання приводу з основними контактами, залипання зажимних елементів у працях [9, 11, 31, 32, 50] використовують ВП вібраційних сигналів, тобто розклад та визначення енергій або ентропії енергій сигналів кожного етапу розкладу. Кожне з цих пошкоджень характеризується в сигналах вібрації своїми певними частотними спектрами та амплітудами. Найбільш цікавою із зазначених праць є робота [32], де окрім характеристичної вейвлет-ентропії та спектральної вейвлет-ентропії енергії додатково розраховуються сингулярна спектральна ентропія та ентропія спектральної потужності. За словами авторів одночасний аналіз декількох ентропій дає можливість запобігти отриманню неправильних висновків щодо пошкоджень елементів, оскільки різні типи пошкоджень можуть характеризуватися близькими один до одного частотними спектрами, які навіть можуть частково перекриватися. Для того щоб уникнути помилкових висновків щодо причин механічних пошкоджень, запропоновано формувати власні вектори ентропії, які порівнюються з граничними власними векторами із встановленими межами для різних типів пошкоджень.

Звісно, вимірювання вібраційних та акустичних сигналів і моніторинг параметрів, отриманих у результаті обробки цих сигналів перетвореннями Гільберта-Хуанга та (або) ВП, є і буде досить перспективним напрямком майбутніх досліджень та практичних розробок. Наразі цей напрямок є ще мало розвинутим і дослідженим, оскільки необхідний час для збору інформації про механічні пошкодження вимикачів з одночасним аналізом вібраційних сигналів за таких пошкоджень, встановлення кореляційних зв'язків між типом пошкодження чи відмови вимикача та появою чи зміною при цьому певних параметрів або характеристик сигналів, що підлягають аналізу.

У працях [8, 34, 38, 51] показано, що крива руху основних контактів вимикача, особливо в поєднанні з очищеним від шуму та імпульсів струмом котушки вмикання/вимикання, містить багато важливої інформації про механічний стан вимикача та стан його кола управління. Аналіз струму та кривої руху відбувається в часовому просторі. Фіксується значення певних пікових точок цих кривих та моменти їхнього настання, а також тривалість горіння дуги, швидкість замикання контактів, швидкість розмикання контактів, відстань, яку проходить основний рухомий контакт. Моніторинг зміни цих параметрів за тривалої експлуатації вимикача дає можливість зробити висновки про стан та опір котушки вмикання/вимикання, стан допоміжних контактів, необхідність у змащуванні мастилом засувки та плунжера та ін.

Важливою характеристикою ТС ВВ, насамперед стану дугогасних пристроїв і головних контактів, є його залишковий комутаційний ресурс, плинне значення якого визначається в процесі експлуатації як різниця між кількістю можливих циклів відключення вимикачем номінального струму, що вказана заводом-виготовлювачем, і кількістю таких циклів, які зможе виконати вимикач після кожного чергового спрацювання. Огляд використаних для визначення залишкового комутаційного ресурсу ВВ методів, а також один з можливих шляхів підвищення точності і вдосконалення методики визначення залишкового комутаційного ресурсу ВВ та його моніторингу представлено у [44].

Виходячи з наведеного вище, приходимо до висновку, що окремі діагностичні параметри, які отримані в процесі математичної обробки виміряних різних фізичних величин та контроль їхніх змін у часі, дають можливість оцінювання поточного ТС лише окремих складових вимикача та його кола управління. За таких умов висновок про ТС ВВ є досить локальним, оскільки окрім використаних при цьому діагностичних параметрів існує ряд інших величин та параметрів (таблиця), зміна яких у процесі експлуатації вимикача також може впливати на точність визначення його ТС. Глобальний і повноцінний висновок про ТС вимикача може бути отриманий шляхом злиття усіх контрольованих параметрів в одне ціле з метою урахування їхнього впливу на ТС ВВ і виконання комплексного аналізу.

Спроби створення таких експертних систем із використанням сучасних різноманітних математичних теорій та методів, включно і комбінацій методів обробки даних, частково описані у працях [1,11,17-19,27,34,37,38,50]. У найбільш цікавій з цих праць [38] описана методологія ймовірнісного оцінювання ТС ВВ на основі інтелектуального аналізу даних on-line моніторингу струму котушки вимкнення і часових даних допоміжних контактів. Такий аналіз передбачає визначення числа діагностичних ознак з найменшою кореляцією з використанням коефіцієнта Пірсона, подальше групування ознак з різними рівнями подібності у значимі кластери методом агломераційної кластеризації та інтерпретацію результатів кластеризації з ймовірнісної точки зору, тобто використання ймовірнісного класифікатора одного зі станів вимикача: нормального, тривоги і надзвичайного (аварійного). Будь-які нові дані, які надходять у результаті моніторингу стану вимикача, порівнюються з даними кластеризації і робиться висновок про ТС вимикача. Це дозволяє вирішити ще одну актуальну задачу в сфері моніторингу – усунення залежності схеми прийняття рішень від знань та досвіду користувача, оскільки некоректне оцінювання стану вимикача може призвести до непотрібного обслуговування та збільшення його вартості.

У роботі [19] досить поверхнево описана спроба оцінювання ТС вимикача на основі використання теорії хмари до злитих в одне ціле різних контрольованих величин (швидкість, відстань, кількість операції), тому дати оцінку значимості цієї праці важко. В [11] використано метод опорних векторів, який дозволяє класифікувати дані на основі теорії статистичного навчання. Основним принципом методу є визначення оптимальних гіперплощин класифікації даних відповідно до встановлених вимог. Далі за допомогою алгоритму навчання будуються функції рішення. У статті використано алгоритм послідовного навчання для створення функції рішення. Таким чином, було розроблено дві функції рішення, перша з яких аналізує дані діагностичних параметрів, отримані в результаті обробки вібраційних сигналів, а друга − параметри струмів котушки вмикання/вимикання. У [50] застосований такий самий підхід, проте функція рішення побудована тільки для параметрів вібраційних сигналів.

У праці [37] застосовано теорію нечіткої логіки до параметрів котушки вмикання/вимкнення з найменшими кореляційними зв’язками. Зокрема, параметри струму котушки аналізуються за допомогою ймовірнісних функцій розподілу цих параметрів, далі ці ймовірнісні дані підлягають аналізу методами нечіткої логіки, що складаються з чотирьох етапів: підготовка ймовірнісних даних з метою застосування методів нечіткої логіки; встановлення нечіткого логічного висновку; отримання нечітких вихідних даних та перетворення даних нечіткої логіки в фактичні числові значення, які вказують на ТС вимикача. Застосування теорії нечіткої логіки для оцінки ТС вимикача також розглядається у [27, 34].

Застосування штучної нейронної мережі для розпізнавання пошкоджень та оцінювання ТС вимикача описано в [1], де використано нейронну мережу з радіально базисною функцією, яка, за словами авторів, при надходженні невідомих для мережі значень параметрів не робитиме помилкових рішень на відміну від нейронної мережі зі зворотним поширенням. Входом у мережу є набір різних параметрів, що обробляються мережею, а на виході отримується інформація про стан вимикача. Поєднання теорії нечіткої логіки з можливостями штучних нейронних мереж запропоновано у [17, 18], що, на думку авторів, є найбільш ефективним рішенням для оцінки ТС вимикача.

Висновки. Виходячи з результатів проведеного огляду, доходимо наступних висновків.

1. On-line моніторинг є важливою складовою комплексної автоматизації та інтелектуалізації високовольтних електричних мереж і ключовою проблемою у провадженні прогресивних систем обслуговування ВВ і керування їхнім технічним станом.

2. Існує великий різновид методів on-line моніторингу ТС вимикачів, які характеризуються різними рівнями досліджень і наукового обґрунтування, різними можливостями, складністю та вартістю використання. Серед них найбільш вживаними є часово-частотні методи, зокрема вейвлет-перетворення, використання яких відкриває нові можливості в on-line моніторингу технічного стану вимикачів.

3. Найбільш важливими задачами розробки, побудови і впровадження сучасних систем моніторингу ВВ є:

− розробка національної системи нормативно-правового забезпечення моніторингу електротехнічного обладнання, включно і моніторингу ВВ;

− створення давачів, здатних використовувати показники моніторингу в режимі реального часу з прийнятними точністю та вартістю;

− накопичення більшого досвіду і знань про стан вимикача відносно його вимірюваних параметрів;

− вибір контрольованих показників моніторингу і відповідних їм діагностичних ознак;

− розробка, вибір і наукове обґрунтування ефективних математичних методів обробки та аналізу сигналів різного роду давачів інформації про робочий стан вимикача;

− реалізація в системах моніторингу параметрів та ТС вимикача трьохетапної обробки вхідних даних: I етап – цифрова фільтрація (очищення від завад); II етап – обробка очищених даних та визначення тенденцій їхньої зміни відносно даних баз даних; III етап – комплексний аналіз тенденцій змін інформативних даних і прийняття рішення щодо ТС вимикача;

− реалізація системного підходу до моніторингу, охоплення ним максимальної кількості компонентів вимикача та розширення функціональних можливостей систем.

Вирішення зазначених задач забезпечить підвищення технічної досконалості, завершеність і функціональну повноту моніторингових систем, сприятиме успішній реалізації нової прогностичної стратегії технічного обслуговування ВВ, а відтак і підвищенню надійності, безпеки і ефективності функціонування як ВВ, так і усієї електроенергетичної галузі країни.

1. Ai-min L., Xin L., Xiang-dong L. Fault diagnosis method of high voltage circuit breaker based on (RBF) Artificial neural network. IEEE PES *Transmission and distribution* conference and exhibition: Asia and Pacific, Dalian, China, August 18, 2005. Pp. 1-4.

2. Bosma A., Thomas R. Condition monitoring and maintenance strategies for high-voltage circuit breakers. Proceedings of 6th international conference on *advances in power system control, operation and management*. Hong Kong . November 11-14, 2003. Pp. 191-196. DOI: http://doi.org/10.1049/cp:20030585

3. CAN/CSA-Q634-91. Risk analysis requirements and guidelines. CSA, Toronto, 1991. 42 p.

4. CBWatch-2. Modular monitoring system. User`s manual. 07-2001 D1087EN/04. 53 p.

5. CEA Project No. 485T1049 (1997). On-line condition monitoring of substation power equipment. Utility needs. January 1997.

6. Chao L., Xiaoguang H. A new method of fault diagnosis for high-voltage circuit breakers based on Hilber-Huang transform. 2nd IEEE Conference on *Industrial Electronics and Applications*, Harbin, China, May 23-25, 2007. Pp. 2697-2701.

7. Fan Y., Chenxi Q., Xiaohui Z., Jun D., Xiaoguang H. Integrated state test system of high voltage circuit breakers based on embedded technology.2011 6th IEEE Conference on *Industrial Electronics and Applications*. Beijing, China, June 21-23, 2011. Pp. 1605-1609.

8. Fan Y., Xiaoquang H. Research on the mechanical state parameter extraction method of high voltage circuit breakers.2012 10th IEEE International Conference on *Industrial Informatics.* Beijing, China, July 25-27, 2012. Pp. 1062-1066.

9. Fazio G., Muzi F., Ricci S., Sacerdoti G. Circuit-breaker diagnostics based on continuous wavelet transform. 2003 IEEE Bologna PowerTech Conference, Bologna, Italy. June 23-26, 2003. Pp. 85-91.

10. Fu C., Hao J. On-line monitoring system based on vibration signal of high voltage circuit breaker. *Journal of multimedia*. 2014. Vol. 9. No 4. Pp. 598-604. DOI: http://doi.org/10.4304jmm.9.4.598-604

11. Geng P., Song J., Xu C., Zhao Y. Fault pattern recognition method for the high voltage circuit breaker based on the incremental learning algorithms for SVM. 2016 International Conference on *Condition Monitoring and Diagnosis*. Xi'an, China, September 25-28, 2016. Pp. 693-696. DOI: http://doi.org/10.1109/CMD.2016.7757917

12. GKD 34.20.507-2003. Technical operation electrical substations and networks. Rules. Kharkiv: Industriia, 2010. 608 p. (Ukr)

13. GND 34.47.503-2004. Guide for operation SF6 circuit breaker. Kyiv: OEP«GRIFE», 2004. 40 p. (Ukr)

14. Grijp M. H. B., Bedet J.S., Hopkins R.A., Greyling J.E. Condition monitoring of high voltage circuit breakers. 1996 IEEE AFRICON 4th AFRICON conference in Africa, South Africa, University of Stellenbosch, November 25-27, 1996. Pp. 880-885.

15. Guenzi G., Politano D. EHV substation reliability improvement by means of circuit breakers autodiagnostic. 2003 IEEE Bologna *Power Tech Conference* Proceedings. Bologna, Italy, June 23-26, 2003. Pp. 1-6. DOI: http://doi.org/10.1109/PTC.2003.1304143

16. Hoidalen H.K., Runde M. Continuous monitoring of circuit breakers using vibration analysis. *IEEE Transaction on power delivery*. 2005. Vol. 20. No 4. Pp. 2458-2465. http://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.855486

17. Hongxia M., Honghua W. Research on fault diagnosis method of high-voltage circuit breaker based on fuzzy neural network data fusion. 2010 International Conference on *Computer Application and System Modeling*. Taiyuan, China, October 22-24, 2010. Vol. 11. Pp. 231-235. http://doi.org/10.1109/ICCASM.2010.5623219

18. Hou P., Bai S., Ge Y., Zhang Y., Zhang H. Research on expert diagnosis system for mechanical fault of high voltage circuit breaker based on fuzzy matrix and neural network technology. 2016 International Conference on *Condition Monitoring and Diagnosis*, Xi'an, China, September 25-28, 2016. Pp. 139-143. http://doi.org/10.1109/CMD.2016.7757795

19. Hu C., Tao F., Yang J., Liang Y., Wang Y. An assessment method for electrical life of vacuum circuit breakers based on cloud model. 2014 International Conference on *High Voltage Engineering and Application.* Paznan, Poland, September 8-11, 2014. P-2-29. Pp. 1-4.

20. Hu X., Wang J., Ji Y., Yu W. The application of the wavelet analysis of analytic signals in mechanical fault diagnosis of circuit breakers. *Transaction on power delivery*. 1996. Vol. 11. No 2. Pp. 2235-2240.

21. IEC 60812:2006. Analysis techniques for system reliability. Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA). IEC, Swizerland. January 2006. 93 p.

22. IEEE 100-2000. The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms, Seventh Edition. IEEE Press, USA, December 2000. 1352 p.

23. IEEE Std 493-2007. IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Gold Book). The IEEE Inc., USA, June 2007. 464 p.

24. IEEE Std C37.10.1-2000. IEEE Guide for the selection of monitoring for circuit breakers. The IEEE Inc., USA, April 2001. 55 p.

25. IEEE Std C37.10-2011. IEEE Guide for Investigation, Analysis, and Reporting of Power Circuit Breaker Failures. The IEEE Inc., USA, December 2011. 59 p.

26. Jeyaraj S.G., Yehdego H. Effective and efficient circuit breaker analysis. IET Conference on *Reliability of Transmission and Distribution Networks.* London, United Kingdom, November 22-24, 2011. Pp. 157-163. http://doi.org/10.1049/cp.2011.0532

27. Jianwei G., Ying W., Ping X. Fuzzy theory application in the evaluation of high-voltage circuit breaker state / 2013 Fifth International Conference on *Computational and Information Sciences*, Shiyan, Hubey, China, June 21-23, 2013. Pp. 829-832.

28. Jin X., Liujun Z., Xiaoquang H., Liang L., Lei Z. Development of on-line monitoring system for SF6 circuit breaker. 2011 6th IEEE Conference on *Industrial Electronics and Applications*. Beijing, China, June 21-23, 2011. Pp. 537-541.

29. Kim M.-H., Kim K.-H., Smajkic A., Kapetanovic M., Muratovic M. Influence of contact erosion on the state of SF6 gas in interrupted chambers of HV SF6 circuit breakers. 2014 IEEE International *Power Modulator and High Voltage* Conference. Santa Fe, New Mexico, June 1-5, 2014. Pp. 466-469.

30. Kokorin E.L., Khalyasmaa A.I. Electrical equipment condition based maintenance strategy. 2016 International conference and exposition on *electrical and power engineering.* Iasi, Romania, October 20-22, 2016. Pp. 748-753.

31. Lee D. S. S., Lithgow B.J., Morrison R.E. New fault diagnosis of circuit breakers. *IEEE Transaction on power delivery*. 2003. Vol. 18. No 2. Pp. 454-459. http://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.809615

32. Liu M., Sun L., Zhen J., Li J. Fault diagnosis of high voltage circuit breaker based on multiple entropy strips method. 2011 6th IEEE Conference on *Industrial Electronics and Applications*. Beijing, China, June 21-23, 2011. Pp. 504-508.

33. Manea I., Chiciu C., Balasiu F., Tulici N. Complex method to diagnose the technical state of the medium and high voltage circuit breakers after short-circuit events. *16th International conference and exhibition on electricity distribution*. Amsterdam, Netherlands, June 18-21. Port. 1. Publication No 482. Pp. 1-5.

34. Mei F., Zhu K., Zheng J., Zhu M. Design of high voltage vacuum circuit breaker's on-line monitoring and fault diagnosis system. 2016 IEEE *Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control* Conference, Xi`an, China, October 3-5, 2016. Pp. 408-413.

35. Munteanu R.A., Balan H., Pop A.A., Buzdugan M. Wavelet analysis in monitoring and diagnosis of power circuit breakers. 2014 International Conference on *applied and theoretical electricity.* Craiova, Romania, October 23-25, 2014. 8.10. Pp. 1-6.

36. Muyi L., Jian H., Xiaoguang H. Insulative condition monitoring of high voltage circuit breaker. 2010 the 5th IEEE Conference on *Industrial Electronics and Applications*. Taichung, Taiwan, June 15-17, 2010. Pp. 94-98.

37. Razi-Kazemi A.A. Circuit breaker condition assessment through a fuzzy-probabilistic analysis of actuating coil`s current. *IET Generation, Transmission, Distribution*. 2015. Vol. 10. No 1. Pp. 48-56. http://doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.1236

38. Razi-Kazemi A.A., Vakilian M. Niayesh K., Lehtonen M. Data mining of online diagnosed waveforms for probabilistic condition assessment of SF6 circuit. *IEEE Transaction on power delivery*. 2015. Vol. 30. No 3. Pp. 1354-1362. http://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2399454

39. Ruben D.G. High voltage circuit breakers: design and application. New York, Basel: Marcel Dekker, Inc., 2002. 456 p.

40. Silva M.S., Jardini J.A., Margrini L.C. On-line condition monitoring system for in-service circuit breaker. Cired 18th International conference on *electricity distribution*. Turin, 6-9 June, 2005. Pp. 1-7. http://doi.org/10.1049/cp:20050962

41. Sopel M.F., Tutik V.L., Panov A.V., Pylypenko Y.V. Operating system monitoring algorithms for electrical networks and power switches working conditions. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2006. Vol 14. No 2. Pp. 22-25. (Ukr)

42. Stognii B.S., Sopel M.F., Maksimchuk V.F., Tutik V.L., Mychailevski O.C., Panov A.V., Stasiuk O.I., Tarasevuch P.Y., Voitiv D.V. Microprocessor based system for monitoring and forecasting residual interruption resource of SF_6 high-voltage circuit breaker. Patent UA № 73398, 2009. (Ukr)

43. Stognii B.S., Sopel M.F., Stasiuk O.I. Scherbakova I.O., Tutik V.L., Goncharova L.L., Zhelezniak A.L. Mychailevski O.C., Slynko V.M. Microprocessor based system for monitoring and forecasting residual interruption resource of overhead high-voltage circuit breaker. Patent UA № 44712, 2009. (Ukr)

44. Stognii B.S., Sopel M.F., Tretiakova L.D., Tankevych E.M., Panov A.V., Pankiv V.I. Evaluation of high-voltage circuit breaker interruption resource. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 1. Pp. 71–80. (Ukr)

45. Sun L., Liu M., Qian H., Qiao C. A new method to fault diagnosis for circuit breakers based on characteristic entropy of wavelet packet. 2011 Second International Conference on *Digital Manufacturing and Automation.* Zhangjiajie, Hunan, China, August 5-7, 2011. Pp. 63-68.

46. Sun L., Yang P., Liu M., Wang K. A method of classified HV circuit breaker fault signal based on EEMD and BP neural network. 2016 IEEE International Conference on *Electronic Information and Communication Technology.* Harbin, China, August 20-22, 2016. Pp. 244-248.

47. Suwanasri T., Wattanawongpitak S., Homkeanchan T., Suwanasri C. Failure statistics and inventory management for high voltage circuit breaker using statistical distribution techniques. 2012 IEEE International Conference on *Condition Monitoring and Diagnosis.* Bali, Indonesia, September 23-27, 2012. Pp. 513-516. http://doi.org/10.1109/CMD.2012.6416192

48. Switch monitor OLM. User reference manual. ELCON REG NO R90895-02 1998. Edition 2.1, 2006-11-13 – 39 p.

49. Wenhua L., Xiaoquang Y., Jun L., Man Y., Sheng Z. Study on the comprehensive test technology of circuit breaker mechanical life and its accessories based on virtual instrument. 26th International Conference on *Electrical Contacts.* Beijing, China, May 14-17, 2012. Pp. 465-470. http://doi.org/10.1049/cp.2012.0698

50. Xue J., Sun L., Liu M., Qiao C., Qiao H. A new method of fault diagnosis for high voltage circuit breakers based on vibration signals. Proceedings of the 2009 International conference on *mechatronics and automation.* Changchun, China, August 9-12, 2009. Pp. 4817-4821.

51. Zhong C., Yang R.-G., Cui J. Mathematical morphology method for pre-processing of coil current waveforms of circuit breakers. *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering* Conference, Chengdu, China, March 28-31, 2010. Pp. 1-4. http://doi.org/10.1109/APPEEC.2010.5448950

УДК 621.316.5

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ МОНИТОРИНГА И ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

А.В. Панов, **В.И. Панькив, М.Ф. Сопель** докт.техн.наук, **Б.С. Стогний,** акад. НАН Украины,
Е.Н. Танкевич, докт.техн.наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина, **e-mail: av-panov@ukr.net**

Определены факторы, которые предопределяют необходимость изменения стратегии технического обслуживания высоковольтных выключателей энергосистем – постепенного перехода от периодического обслуживания к обслуживанию на основе оценки технического состояния выключателя и его надежности. Показано, что важнейшим условием внедрения прогрессивных систем технического обслуживания и управления техническим состоянием этого слишком ответственного электрооборудования энергосистем является построение систем его on-line мониторинга. Выявлены и изучены актуальные вопросы построения таких систем, среди которых важнейшими признано разработку, выбор и научное обоснование эффективных методов обработки и анализа сигналов различного рода датчиков информации о техническом состоянии выключателей.

Библ. 51, табл. 1.
Ключевые слова: высоковольтный выключатель, техническое обслуживание, стратегия, мониторинг, сигнал, методы обработки.

TOPICAL ISSUES OF HIGH-VOLTAGE CIRCUIT BREAKER MONITORING AND MAINTENANCE

A.V. Panov, V.I. Pankiv, M.F. Sopel, B.S. Stognii, E.M. Tankevych
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, **e-mail: av-panov@ukr.net**

The factors that determine need to change the maintenance strategy for high-voltage circuit breaker were identified - the gradual transition from time-based service to service based on the evaluation of the technical condition of the circuit breaker and its reliability. It is shown that the most important condition for the introduction of advanced systems of technical maintenance and control of the technical condition of this highly responsible electrical equipment of power systems is the construction of its on-line monitoring systems. The urgent issues of such systems designing were identified and studied, among which the development, selection and scientific explanation of effective methods of signal processing and analysis of different kinds of sensors of information about the technical condition of circuit breaker is recognized as the most important. References 51, table 1.
Keywords: high-voltage circuit breaker, maintenance, strategy, monitoring, signal, processing methods.
Надійшла 28.07.2017
Остаточний варіант 05.09.2017