

УДК 621.316.5

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МЕХАНІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ****А.В. Панов**, пров. інж, **В.І. Паньків** асп., **М.Ф. Сопель**, докт. техн. наук, **Є.М. Танкевич**, докт. техн. наукІнститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна  
e-mail: [av-panov@ukr.net](mailto:av-panov@ukr.net)

*На основі розгляду структури, фізичних процесів та функціонування блока керування та привідного механізму високовольтного вимикача виконано аналіз діагностичних показників і показників моніторингу та способів їх визначення з точки зору інформативності, обґрунтованості та ефективності використання в системах он-лайн моніторингу вимикачів. Запропоновано метод і алгоритм комплексного автоматичного визначення показників моніторингу механічних елементів вимикача включно і ряду нових, запропонованих у роботі показників, що стосуються котушок вимкнення/вмикання, таких як локальні екстремуми струмів і відповідні їм моменти часу, активний опір, індуктивність та стала часу затухання струму котушок. Бібл. 13, рис. 6.*

**Ключові слова:** високовольтний вимикач, блок керування, привідний механізм, технічний стан, моніторинг.

**Вступ.** Високовольтні вимикачі (ВВ) є критично важливим обладнанням в електроенергетичних системах (ЕЕС). Вони слугують зв'язком між генерацією та споживанням електроенергії, відповідно надійність і продуктивність їх функціонування значно впливають на надійність та стабільність самої ЕЕС. З метою забезпечення надійної і стабільної експлуатації ВВ проводяться їх регулярний огляд та обслуговування, що є не завжди економічно виправданим, оскільки відбувається або надлишок обслуговування, або воно недостатнє, результатом чого є можлива відмова вимикача.

Узагальнена статистика пошкоджень ВВ [1] свідчить про те, що найбільш ймовірними чинниками відмови вимикача є механічні пошкодження або зношення елементів привідного механізму чи контактної системи. Застосування системи моніторингу параметрів вимикача дає змогу отримувати значний перелік корисної інформації про технічний стан (ТС) у вигляді показників моніторингу (ПМ), подальша обробка якої дає змогу не тільки виявляти можливі пошкодження окремих частин вимикача, але й заздалегідь прогнозувати можливі відмови без виведення його з експлуатації. Зазначимо, що під показником моніторингу розуміється властивість (величина) об'єкта моніторингу, обрана для його спостереження та оцінювання стану за часом або простором [2].

Технічний стан елементів і вимикача в цілому зазвичай визначається шляхом обробки даних вимірювання та моніторингу, отримуваних від різних елементів вимикача за процесів його вмикання/вимикання. Так, у працях [3-7], де об'єктом дослідження є струми котушок вмикання/вимикання, аналізуються різні діагностичні показники, пов'язані зі значеннями характерних точок кривих струмів (екстремумів) або ж з різними періодами часу, отримуваними в результаті цифрової обробки кривих цих струмів. У працях [8, 9] як джерело інформації використана крива руху основних контактів вимикача. У першій з них діагностичними показниками є швидкість руху основних контактів та відстань, яку вони проходять під час свого руху, в другій – тривалість специфічних чотирьох періодів часу, що характеризують рух контактів, та їх зміни в подальших операціях вмикання/вимикання.

У працях [10–13] описано способи отримання параметрів моніторингу на основі використання та аналізу інформації, одержаної від двох джерел в їх різних комбінаціях. У [10] запропоновано спосіб отримання діагностичних параметрів шляхом поєднання інформації, одержаної від струмів котушок вмикання/вимикання та кривої руху основних контактів вимикача, в [11] – струмів котушок та струму привідного механізму, в [12] – струмів котушок та положення допоміжних контактів, у [13] – кривої руху основних контактів та положення допоміжних контактів. Поглиблений аналіз зазначених праць показує, що не всі пропонувані

й розглядаємі в них контрольовані параметри і характеристики ВВ, що стосуються його блока керування та приводного механізму, і відповідні їм показники моніторингу є достатньо обґрунтованими, інформативними та реально доступними, для того щоб їх використання в алгоритмі розпізнавання стану ВВ, реалізованому в системі моніторингу, забезпечило належну якість моніторингу.

**Мета роботи:** оцінювання можливостей існуючих способів отримання моніторингових даних про ТС ВВ, пошук і обґрунтування нових ПМ, розробка методу і алгоритму комплексного визначення ПМ ТС механічних елементів ВВ з пружинним приводом, використання яких в системах комплексного он-лайн моніторингу забезпечить підвищення інформативності моніторингу та достовірності даних про ТС ВВ, якості його ТО, а відтак і надійності функціонування.

**Структура, фізичні процеси та функціонування блока керування та приводного механізму вимикача.** На рис. 1 зображена схема кіл керування вимикача з пружинним приводним механізмом для вимкненого стану. Як видно з рис. 1, коло керування складається з самої пружини (spring, S), двигуна для накопичення енергії в пружині (motor, M), додаткових контактів (auxiliary contacts, AC), котушок (соленоїдів) вмикання (close coil, CC) і вимикання (trip coil, TC) та реле захисту від повторного замикання допоміжних контактів (anti pumping relay, AR) [3]. Котушки вмикання/вимикання є ідентичними та являють собою обмотку, навиту навколо сталевго осердя (плунжера), який здатний рухатись вздовж обмотки. Додаткові контакти можуть знаходитись у двох станах: «розімкнуто» та «замкнуто». Зміна положень контактів не відбувається миттєво, а з певною затримкою часу. Енергія, необхідна для операцій вмикання/вимикання, зберігається в пружині, яка стискається за допомогою електричного двигуна. Впродовж операції вмикання пружина рухає валом керування, який приводить у дію систему тягових стержнів, спричиняючи при цьому переміщення основного рухомого контакту та заведення пружини вимикання. Пружина вимикання зберігатиме енергію до наступної події розмикання контактів (вимкнення вимикача).

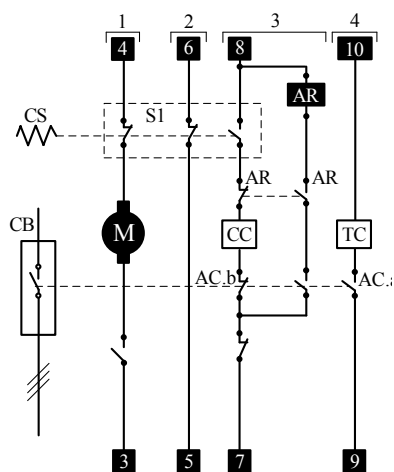


Рис. 1

Аналізуючи основні елементи кола керування вимикача та їх функції, розглянемо процес вимкнення (рис. 2) та визначимо його можливості, як джерела моніторингових даних про ТС вимикача. Ініціатором цього процесу є створений безпосередньо релейним захистом, автоматикою чи опосередковано диспетчером бінарний сигнал (логічна одиниця), який подається в коло керування вимикача на момент часу  $t_0$ . З невеликою затримкою часу  $t_0 - t_1$  на контакти 9-10 кола 4 (рис. 1) подається напруга від підстанційної акумуляторної батареї живлення вторинних кіл. Оскільки додатковий контакт «а» є нормально замкнутим для режиму вимкнення вимикача, в колі 4 з моменту часу  $t_1$  через котушку вимкнення починає протікати струм. Протікаючи через котушку, струм створює в ній потокозчеплення, яке, взаємодіючи з плунжером, утворює навколо нього електромагнітне поле та індукуює в ньому електромагнітну рушійну силу. Внаслідок цього плунжер починає свій рух в бік засувки, який на початкових етапах є сповільненим через вплив на плунжер протидіючих електромагнітній рушійній силі в котушці сил тертя та земного тяжіння, що зменшує швидкість стрімкого зростання струму котушки. Відображенням цього є характерна початкова ділянка кривої струму котушки з дотичною 1 до неї.

У разі перевищення створеними електромагнітним полем і електромагнітною рушійною силою протидіючих сил тертя та тяжіння рух плунжера стає рівномірним, а струм котушки зростає, на що вказує лінійна ділянка кривої струму з дотичною 2 до неї. У міру виходу плунжера з котушки електромагнітне поле між ними зменшується і відповідно зменшується електромагнітна рушійна сила, що спричинила рух плунжера. Проте вплив сил тяжіння та тертя на плунжер все ж таки залишається і це відобразиться на формі кривої струму котушки дещо повільнішим зростанням струму (дотична 3) і досягнення ним свого першого пікового значення  $I_{p1}$ .

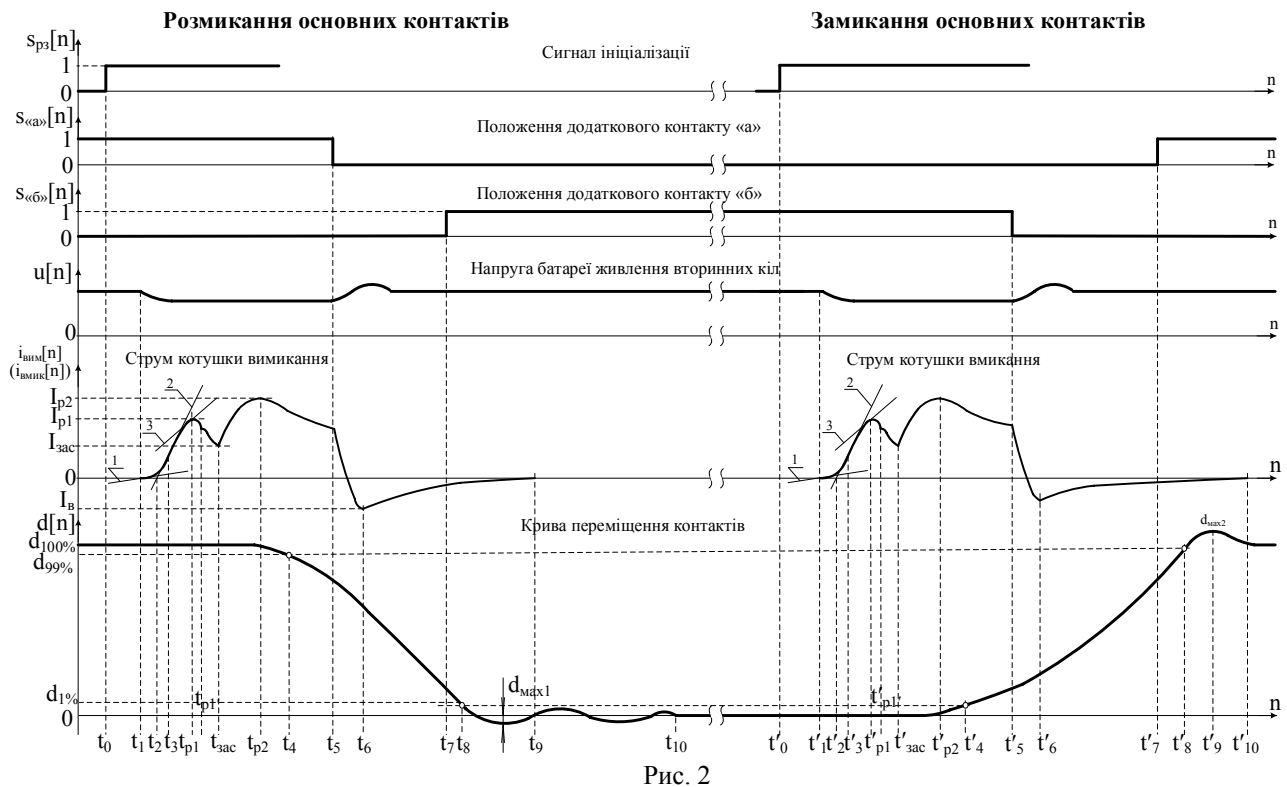


Рис. 2

Через інтервал часу  $t_1 - t_{p1}$  плунжер досягає немагнітного штовхача або зажимної планки (залежно від конструкції), які переміщують засувку. Поєднання інерційної маси плунжера з немагнітним штовхачем, планкою та основною засувкою спричиняє значну протидіючу електромагнітному полю силу і його послаблення, що відображається зменшенням значення струму до локального мінімуму  $t_{зас}$ . Інтервал часу  $t_{p1} - t_{зас}$  – це час взаємодії плунжера з немагнітним штовхачем, зажимною планкою та засувкою. Повне зміщення засувки звільняє шлях плунжеру і відповідно він починає вільно рухатись під дією електромагнітного поля, що відображається на кривій струму різким зростанням його значення до глобального максимуму  $I_{p2}$  на момент  $t_{p2}$ .

На момент часу  $t_{p2}$  на плунжер починає діяти механізм стримування його руху і повернення в початкове положення, що відображається на кривій струму поступовим плавним зменшенням його значення на інтервалі  $t_{p2} - t_5$ .

Зміна положення засувки звільняє накопичену енергію заведеної пружини вмикавання і приводить у дію механізм керування ВВ. Відповідно починає рухатися основний рухомий контакт, а також з певною затримкою часу змінюється положення додаткового контакту «а» з стану «замкнуто» на стан «розімкнуто».

Проміжок часу  $t_{зас} - t_4$  відповідає часу реакції заведеної пружини та механізму керування щодо приведення в дію основного рухомого контакту.  $t_4$  – зафіксований момент проходження основним рухомим контактом деякої відстані від початкової позиції (наприклад, 1 чи 0,5 % усього шляху), яка засвідчує початок його руху. Проміжок часу  $t_{зас} - t_5$  – це час реакції заведеної пружини та механізму керування щодо зміни положення додаткового контакту «а». Розмикання додаткового контакту «а» свідчить про зняття напруги з кола 4 (рис. 1) і зникнення електромагнітного поля, спричиненого дією напруги підстанційної акумуляторної батареї живлення.

У цьому випадку під дією протидіючої електромагнітного полю сили утримувача плунжера відбувається його різке затягування (рух у зворотному напрямку) назад в котушку, цим самим індукуючи електромагнітну рушійну силу в котушці, протилежну раніше створюваній. На кривій струму рис. 2 цей процес відображається різким зниженням значення стру-

му і зміною його полярності на інтервалі часу  $t_3 - t_6$ . Далі плунжер перебуває в стані спокою. За проміжок часу  $t_6 - t_9$  відбувається вільне затухання струму в колі з індуктивністю та опором, якими характеризується сама котушка.

Інтервал часу  $t_4 - t_8$  можна вважати часом руху основних контактів. Момент часу  $t_6$  відповідає 99 % пройденої відстані основним рухомим контактом, тобто це момент, коли він практично дійшов положення «розімкнуто». Зрозуміло, що позиція рухомого контакту в момент  $t_8$  не є його дійсною кінцевою позицією через можливі коливання контакту, проте таке визначення цього моменту, як і моменту початку руху контакту  $t_4$  прийнято з метою уникнення неадекватних вимірювань і забезпечення їх єдності.

На проміжку часу  $t_8 - t_{10}$  відбувається затухання коливань основного рухомого контакту, зумовлених дією його амортизатора.

Оскільки механізм керування поєднує в собі рухомий основний контакт та додаткові контакти «а» і «б», то після проходження основним рухомим контактом майже всієї відстані до положення вимкнуто, змінює своє положення додатковий контакт «б» з стану «розімкнуто» на «замкнуто». В праці [13] для випадку, якщо криву руху неможливо зареєструвати (відсутній датчик), пропонується використовувати для аналізу тривалість часового проміжку  $t_5 - t_7$ , який відповідає часу зміни положень обох додаткових контактів.

Як було зазначено вище, у випадку автоматичного повторного ввімкнення або видачі опосередковано диспетчером команди за необхідності вмикання вимикача, буде сформований сигнал – логічна одиниця на замикання його основних контактів. Відповідно цей процес можна розглядати в новому часовому просторі, присвоївши початку сигналу ініціалізації момент часу  $t'_0$  (права частина рис. 2). У цьому разі напруга від підстанційної акумуляторної батареї живлення подається на затискачі 7-8 кола 3 (рис. 2) і, оскільки положення додаткового контакту «б» є замкнутим, у колі 3 (через котушку вмикання) протікатиме струм. Далі в механізмі керування і механічних елементах вимикача відбуватимуться процеси, аналогічні тим, що описані для операції вимикання. Криві, що характеризують ці процеси, показані на правій частині рис. 2.

**Показники моніторингу механічних елементів ВВ.** Оцінимо можливості отримання моніторингових даних про ТС його механічних елементів з представлених на рис. 2 окремих складових процесу вимкнення ВВ. Інтервал часу  $t_0 - t_1$  від моменту видачі сигналу ініціалізації процесу вимкнення в коло керування вимикача до моменту подачі напруги від підстанційної акумуляторної батареї живлення вторинних кіл пропонується визначати лише в [4, 12], проте не вказано, про що може свідчити цей ПМ.

У працях [3, 5, 6] для діагностування механічних відмов вимикача пропонується визначати перше пікове значення струму котушки  $I_{p1}$ , а також час його досягнення як інтервал часу  $t_0 - t_{p1}$ , який включає в себе й інтервал  $t_0 - t_1$ , що не дає змоги ідентифікувати останній окремо. А це є важливим для моніторингу, оскільки аналіз відхилень дотичних 1, 2, 3 до кривої струму (похідної струму) на трьох різних її ділянках може вказувати не лише на зміну сили тертя на рух плунжера, а відповідно на необхідність поповнення чи заміни мастила. Зазначимо, що такі показники моніторингу, як похідні струму котушки, відповідні дотичним 1, 2, 3, можуть свідчити не лише про зміни сили впливу тертя на рух плунжера і брак мастила (за умов сталої напруги живлення і незмінного опору котушки), а також і про зміни електричного опору котушки (за умов стабільності впливу сили тертя на рух плунжера).

У [7] пропонується фіксувати як ПМ час спрацювання засувки, що визначається як час від моменту  $t'_{p1}$  раптового зменшення швидкості плунжера після його удару в засувку, який належить часовому проміжку  $t_{p1} - t_{zac}$ , до моменту  $t_{zac}$ , досягнення ними двома упору. Як видно з рис. 2, на кривій струму котушки цей процес відображається майже непомітним горизонтальним відрізком. Це неуніверсальний і непродуктивний ПМ, оскільки його значення залежить від типу приводу, в якому можуть бути плунжер і засувка або плунжер, штовхач і засувка. До того ж він важко ідентифікується математичними методами. Натомість доціль-

но визначати час спрацювання засувки (час взаємодії плунжера з немагнітним штовхачем, заживною планкою і засувкою  $t_{p1} - t_{zac}$ ) як інтервал між моментом досягнення струмом першого пікового значення  $I_{p1}$  і локального мінімуму  $I_{zac}$ . Збільшення періоду цього часу сигналізуватиме про появу певних проблем, пов'язаних з цими елементами (залипання засувки, необхідність заміни мастила та ін.). При цьому також доцільно здійснювати паралельний контроль значення  $I_{zac}$ , оскільки його зменшення у разі наступних розмикань основних контактів, зменшення свідчитиме про більшу протидіючу силу інертній масі плунжера та електромагнітній силі, яка призводить його рух.

Збільшення періоду часу  $t_{zac} - t_4$  між моментом зміни положення засувки  $t_{zac}$  і моментом початку руху основним контактом  $t_4$  і періоду  $t_{zac} - t_5$  між моментом зміни положення засувки  $t_{zac}$  і моментом  $t_5$  зміни положення додатковим контактом «а» може свідчити про певні недоліки в механізмі керування, який складається з набору стержнів та їх з'єднань, втрату пружиною еластичності або залипання додаткового контакту.

За умов відсутності датчика руху основного контакту для визначення таких показників он-лайн моніторингу стану привідного механізму і кола керування ВВ як інтервал часу  $t_4 - t_8$  від моменту  $t_4$  початку руху основного контакту до моменту  $t_8$  досягнення кривою руху мінімального значення (операція вимкнення) та інтервал часу від моменту  $t'_4$  початку руху основного контакту до моменту  $t'_8$  досягнення кривою руху максимального значення (операція вмикання) в [13] пропонується контролювати періоди часу дії додаткових контактів. Отже, йдеться про використання наближених значень зазначених ПМ, оскільки в такому разі не враховується затримка часу від початку руху основного контакту  $t_4$  до зміни положення додаткового контакту  $t_5$ .

У працях [6, 10] для оцінювання стану вимикача через струми його котушок вмикання/вимикання пропонується як ПМ друге пікове значення струмів  $t_{p2}$ , але не йдеться на які дефекти чи відмови в механічних елементах вимикача цей ПМ може вказати. Дійсно, це є характерна точка на кривій струму, яка розмежовує дві важливі для моніторингу ділянки, аналіз особливостей яких може бути джерелом корисної додаткової інформації. Перша з них – це зростання струму до максимуму на інтервалі  $t_{zac} - t_{p2}$ , що характеризує вільний рух плунжера під дією електромагнітного поля котушки після повного зміщення засувки, друга – це повільне спадання струму на інтервалі  $t_{p2} - t_5$ , що характеризує силу, стримуючу рух плунжера і повернення його в початкове положення після повного зміщення засувки.

Корисну інформацію про стан вимикача можна також отримати контролюючи значення локального мінімуму струму  $t_{zac}$  котушки, що відповідає моменту повного зміщення засувки. Зменшення значення цього мінімуму порівняно з його нормальним значенням вказуватиме на зростання сили, протидіючої інертній масі плунжера та електромагнітній силі, яка спричиняє його рух.

На думку деяких дослідників, ПМ можуть бути період часу від моменту  $t_5$  розмикання додаткового контакту «а» до моменту  $t_9$  повного затухання струму котушки [7], інтервал  $t_4 - t_8$  – час руху основного контакту під час операції відмикання – час між вибраними точками 99 і 1 % на кривій руху контакту, інтервал  $t'_4 - t'_8$  – час руху основного контакту під час операції замикання [7, 9]. При цьому не вказано, на які конкретні пошкодження чи відмови може вказувати зміна значень ПМ, що розглядаються в них.

Автори вважають за доцільне визначати з цієї останньої ділянки кривої струму котушки такі величини, як період  $t_6 - t_9$  від моменту досягнення плунжером стану спокою  $t_6$  до моменту  $t_9$  повного затухання струму котушки вимкнення (досягнення ним нульового значення), значення глобального мінімуму струму  $I_e$  в момент  $t_6$  зупинки плунжера, а також значення напруги в момент зміни положення додаткового контакту «а». Знання цих величин часу дають змогу розрахувати постійну часу затухання струму котушки, що визначається

співвідношенням її активного опору та індуктивності, а зміни значення цього ПМ при подальших операціях може стати свідченням, наприклад, появи короткозамкнених витків у котушці. Крім того, зміна складових електричного опору котушки – активного опору та індуктивності чи їх співвідношення у разі подальших перемикачів у свою чергу призведе до зміни значень усіх інших, пов'язаних зі струмом котушки, ПМ. Це вказує на важливість здійснення моніторингового контролю постійної часу затухання струму котушки для оцінювання стану механічних елементів вимикача.

Фіксація моментів  $t_4$  і  $t_8$  та часового проміжку  $t_4 - t_8$  має бути важливою операцією моніторингу, оскільки дасть змогу визначити швидкість руху основних контактів. Збільшення часу руху основних контактів в операції вимкнення, тобто зменшення їх швидкості сигналізуватиме про довший час горіння дуги і відповідно швидшу ерозію основних контактів або про можливе зростання сил тертя. І навпаки, зменшення часу руху основних контактів в операції вмикання свідчатиме про збільшення швидкості руху основних контактів і буде сигналом про сильніший від нормального удар основного рухомого контакту в амортизатор і зростання його механічного напруження.

На можливість використання для контролю стану амортизатора часу руху основних контактів  $t_4 - t_8$  за операції вимкнення, тобто інтервалу часу між вибраними точками 99 і 1 % на кривій їх руху вказується в праці [9]. Зміна значення цього ПМ порівняно з нормальним його значенням може свідчити про послаблення дії амортизатора.

На думку авторів, для контролю стану амортизатора важливо і можливо також контролювати період часу затухання вільних коливань основного контакту  $t_8 - t_{10}$  від моменту часу  $t_8$ , що відповідає практично розімкнутим контактам вимикача, до моменту закінчення взаємодії амортизатора та основного рухомого контакту  $t_8$ , де розрахована швидкість контакту буде стабільно нульовою. Зростання амплітуди коливань на періоді часу  $t_8 - t_{10}$  та тривалості цього періоду свідчатимуть про певні недоліки в самому амортизаторі. Контроль часткового виходу рухомого контакту за межі номінальної відстані у разі виконання операції вмикання (точка  $d_{\max 2}$ , відповідна моменту  $t'_9$ , може дати додаткову інформацію про зношення (ерозію) основного нерухомого контакту).

Корисну додаткову інформацію про стан механічних елементів і механізму керування вимикача можна отримати виконуючи моніторинг відношення деяких періодів часу, наприклад  $(t_4 - t_8)/(t_5 - t_7)$ . Якщо період часу  $t_5 - t_7$  зростатиме, наприклад внаслідок залипання додаткового контакту «б», то відношення  $(t_4 - t_8)/(t_5 - t_7)$  зменшуватиметься, що частково дасть можливість ідентифікувати несправність. Проте слід враховувати значення моменту часу  $t_5$  – зміни положення рухомого контакту «а», яка також може статися з запізненням по відношенню до моменту  $t_4$ , оскільки може бути залипання і цього контакту. Тому слід накладати додаткові умови щодо контролю відношення часу  $(t_4 - t_8)/(t_5 - t_7)$ , здійснюючи одночасний контроль відношення періоду  $t_{зач} - t_4$ , що характеризує реакцію заведеної пружини та механізму керування на приведення в дію основного рухомого контакту, до інтервалу  $t_{зач} - t_5$ , який характеризує реакцію заведеної пружини та механізму керування на зміну положення додаткового контакту «а». Якщо це відношення стає для двох послідовних операцій вимикання вимикача, а відношення  $(t_4 - t_8)/(t_5 - t_7)$  зменшилось, то це свідчить про залипання додаткового контакту «б». Якщо відношення  $(t_{зач} - t_4)/(t_{зач} - t_5)$  змінюється з послідовним вимиканням вимикача, то це свідчить про залипання додаткового контакту «а». В загальному розробка алгоритму розрахунку усіх можливих варіантів і значень зазначених співвідношень та їх аналізу може сприяти обґрунтуванню та розширенню складу ПМ вимикача.

Варто також зазначити, що деякі з окремо взятих розглянутих чи пропонованих ПМ можуть безпосередньо не відображати ТС вимикача, однак їх використання в сукупності з усіма іншими ПМ сприятиме підвищенню якості моніторингу і надійності функціонування вимикача.

**Розробка алгоритмів визначення показників моніторингу за його даними.** Припустимо, що записані дані процесу вимкнення вимикача містять такі масиви інформації:  $t[n]$  – масив значень моментів часу, в які відбирались вибірки значень джерел інформації;  $s_{ps}[n]$  – масив значень вибірок бінарного сигналу ініціалізації процесу вимкнення (сигнал від релейного захисту чи диспетчера);  $u[n]$  – масив значень вибірок напруги живлення від підстанційної акумуляторної батареї;  $s_{a^n}[n], s_{b^n}[n]$  – масиви значень вибірок бінарних сигналів, що описують положення додаткових контактів «а» та «б»;  $i_{вим}[n]$  – масив вибірок значень вибірок струму котушки вимкнення;  $d[n]$  – масив значень вибірок переміщення рухомого контакту в бік амортизатора.

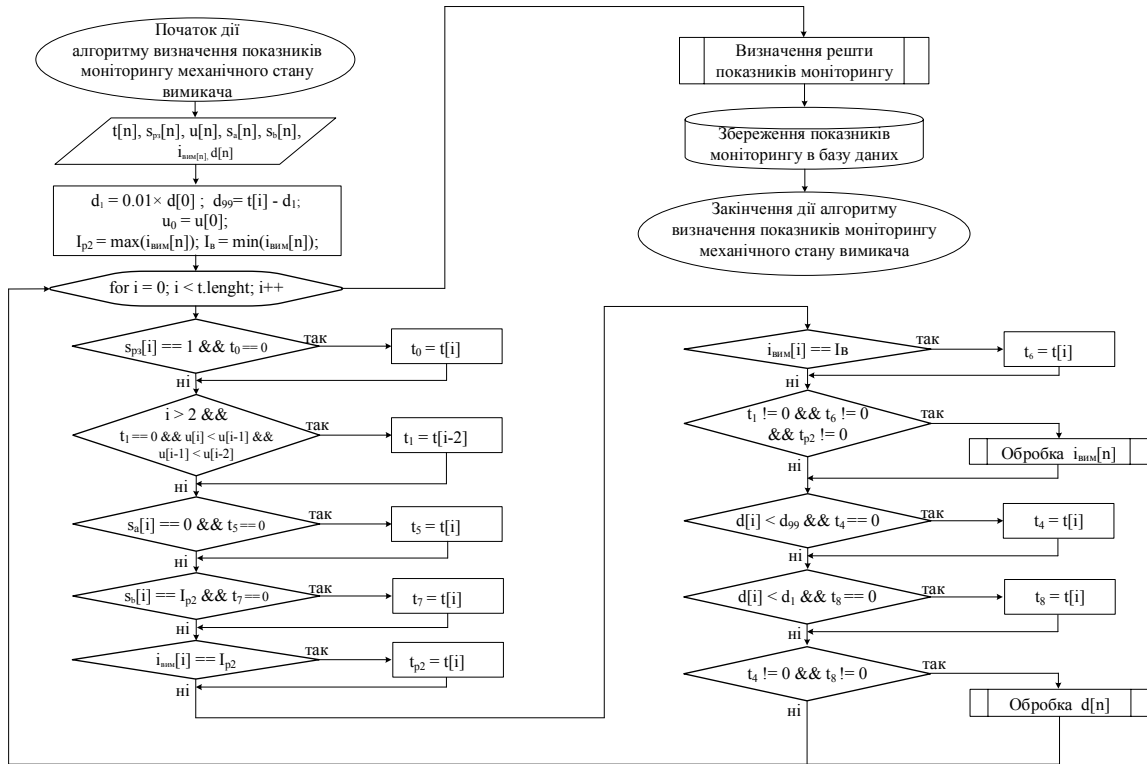


Рис. 3

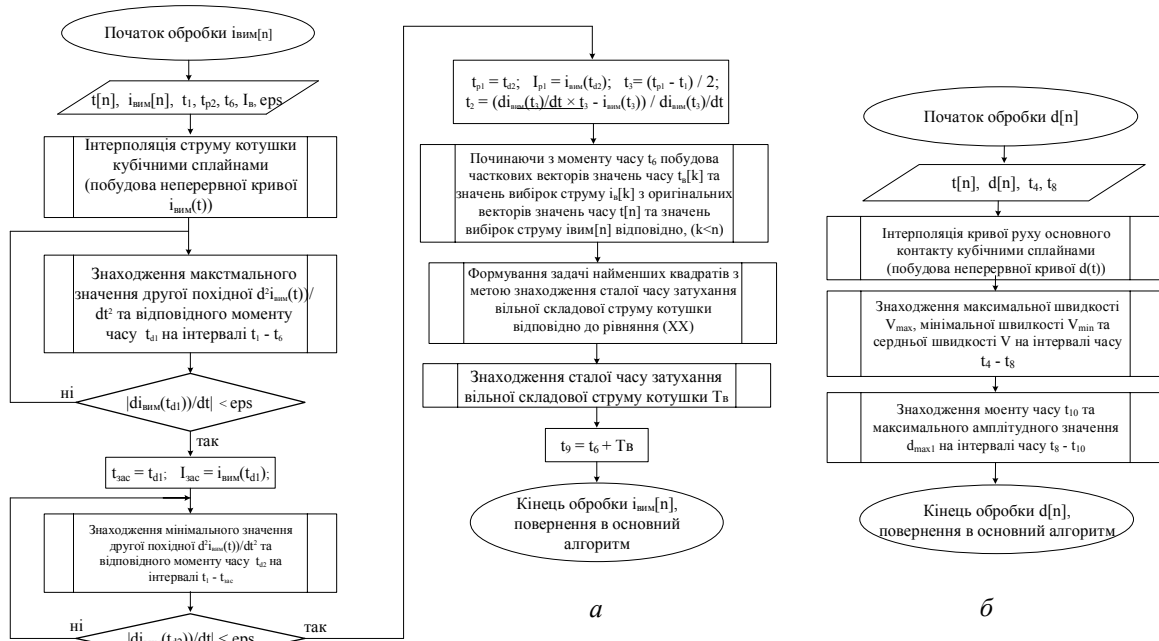


Рис. 4

Алгоритми, які наведено на рис. 3 і 4 *a, б*, описують механізм отримання з даних вимірювань усіх розглянутих показників моніторингу механічного стану вимикача. Для визначення локальних максимуму  $I_{p1}$  та мінімуму  $I_{zac}$  і відповідних їм моментів часу  $t_{p1}$  та  $t_{zac}$  кривої струму котушки за наявності лише дискретних значень вибірок струму  $i_{вим}[n]$  скористаємося відомими твердженнями – умовами наявності локальних екстремумів функції. Якщо функція в точці має локальний екстремум, то значення її першої похідної в цій точці рівне нулю. Також відомо, якщо в точці, де перша похідна функції рівна нулю, а її друга має додатний характер, то це є точка локального мінімуму, і навпаки, якщо друга похідна функції в точці рівності її першої похідної нулю має від'ємний характер, то це засвідчує локальний максимум функції.

Проте застосування чисельних методів розрахунку першої та другої похідних функцій до дискретних значень вибірок струму у відповідні моменти часу призводить до значних похибок у визначенні ПМ. Тому для згладжування та побудови неперервної функції, що дало б можливість визначення неперервних першої та другої похідних струму, здійснюється інтерполяція дискретних даних струму кубічним сплайном.

Інтерполювавши криву струму та маючи значення моментів часу  $t_1$  та  $t_{p2}$ , спершу визначимо момент часу  $t_{zac}$ , дотримуючись умови  $di_{вим}(t)/dt \approx 0$ ,  $d^2i_{вим}(t)/dt^2 \rightarrow \max$  на проміжку часу  $t_1 - t_{p2}$ . Аналогічно визначимо момент часу  $t_{p1}$ , дотримуючись умови  $di_{вим}(t)/dt \approx 0$ ,  $d^2i_{вим}(t)/dt^2 \rightarrow \min$  на проміжку часу  $t_1 - t_{p2}$ . Локалізація періоду часу пошуку локальних екстремумів струмів  $t_{p1}$  і  $t_{zac}$  у рамках  $t_1 - t_{p2}$  значно зменшує кількість обчислень та унеможливорює знаходження помилкових моментів часу, наприклад, поза межами  $t_1 - t_{p2}$ , де  $t > t_{p2}$ . Маючи інтерпольовану функцію  $i_{вим}(t)$ , можна визначити значення струмів у визначені моменти часу  $t_{zac}$  та  $t_{p1}$ .

Знання моменту часу  $t_{p1}$  дає можливість визначити присутність певних протидіючих руху плунжера сил. Для цього визначається середина інтервалу часу  $t_1 - t_{p1}$ , тобто момент часу  $t_3 = (t_{p1} - t_1)/2$ , коли подолавши протидіючі сили, плунжер буде рухатись з постійною швидкістю, що відповідає дотичній 2 (рис. 2) та наведеним вище твердженням. Перетин дотичної 2 з віссю абсцис, де  $f(x) = 0$ , дає можливість, скориставшись рівнянням дотичної в точці до кривої, що має вигляд

$$f(x) = y(x_0) + \frac{dy(x_0)}{dx}(x - x_0),$$

визначити момент часу  $t_2$ , коли плунжер починає рухатися стабільно швидко,

$$t_2 = \frac{di_{вим}(t_3)/dt \cdot t_3 - i_{вим}(t_3)}{di_{вим}(t_3)/dt}$$

та час  $t_1 - t_2$  затримки плунжера на подолання протидіючих його руху сил тертя.

Як приклад, для струмів котушок вимкнення, показаних на рис. 5 *a* та *б*, значення  $t_2$  відповідно становлять 0,00124 с та -0,00061 с. Для випадку *б* знак «мінус» свідчить про те, що протидіючих руху плунжера сил не було і він вільно рухався в бік засувки. Проте у випадку *a*, де явно видно певну затримку плунжера в часі, значення  $t_2$  має додатний характер і вказує на необхідність перевірки ТС плунжера, наприклад, якості його змащування.

Вагоме значення в моніторингу ВВ має контроль опору та індуктивності котушки вимкнення/вмикання, оскільки це дає змогу відслідковувати появу короткозамкнених витків у котушці, що негативно впливає на подальшу працездатність кола керування і вимикача в цілому. Визначення цих величин здійснюється на основі розгляду процесу зникнення струму в котушці після зміни положення додаткового контакту «а» і зняття напруги батареї живлення вторинних кіл як процесу затухання вільної складової струму у колі з постійним струмом та раптовим розмиканням контактів, що описується таким рівнянням:  $i_e(t) = A \cdot e^{-t/T_e}$ , де  $A$  –



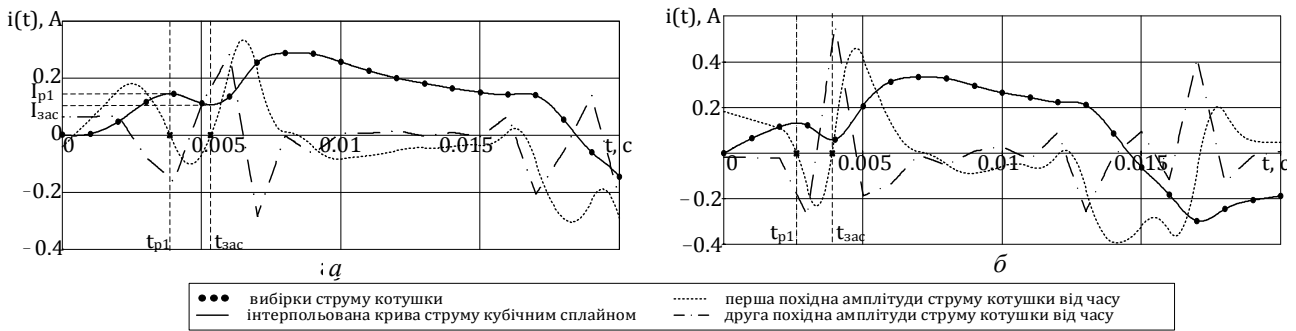


Рис. 5

стала інтегрування, яка в цьому випадку рівна значенню  $I_e$ , тобто глобальному мінімуму повного струму котушки, а  $T_e$  – постійна часу затухання вільної складової струму, яка залежить від параметрів  $R$  та  $L$  котушки і є невідомою.

Для цього задача знаходження значення постійної затухання  $T_e$  відповідно до методу найменших квадратів представляється в такому вигляді:

$$\sum_{p=0}^k [i_e[p] - i_e(t_e[p])]^2 = \sum_{p=0}^k [i_e[p] - I_e e^{-t_e[p]/T_e}]^2 \rightarrow \min,$$

де  $i_e[p]$  – вектор значень вибірок струму котушки  $i_{вм}[n]$ , починаючи з моменту часу  $t_e$ ;  $t_e[p]$  – вектор значень перерахованих моментів часу вектора  $t[n]$  по відношенню до осі ординат, починаючи з моменту часу  $t_e$ . Розв’язок задачі найменших квадратів дає можливість точно знайти сталі часу котушок вимкнення/вмикання вимикача.

Наприклад, для струмів котушок вимкнення рис. 4 а і б розраховані таким способом постійні часу мають значення 0,00656 с та 0,00875 с відповідно. Достовірність розрахованих значень постійних часу  $T_e$  підтверджена побудованими відповідними їм апроксимуючими кривими струмів  $i_e(t)$  (рис. 6).

Виходячи з припущення, що глобальне пікове значення  $I_{p2}$  на момент часу  $t_{p2}$  це є значення струму в колі постійного струму з опором лише самої котушки, утримуюча плунжер сила починає втягувати плунжер назад у котушку з певною затримкою часу після  $t_{p2}$ , що пояснюється майже рівномірним «пагорбом» навколо пікового значення  $I_{p2}$  (див. рис. 2), можна визначити опір самої котушки як  $R = u[t_{p2}]/i_{вм}[t_{p2}]$ . Знаючи опір  $R$  котушки та її постійну часу  $T_e$ , можна визначити значення індуктивності котушки  $L = T_e \cdot R$ .

За цим же алгоритмом обробляються дані кривої руху вимикача та визначаються відстані, пройдені головним контактом за визначені періоди часу, максимальна, мінімальна та середня його швидкості руху, тривалість переміщення основного контакту вимикача, тривалість коливального процесу дії амортизатора та максимальна амплітуда дії амортизатора.

Усі одержані ПМ записуються і зберігаються в базі даних подій вимикачів, де з подальшим накопиченням даних аналізуються на предмет відхилення порівняно з нормальними значеннями у разі приблизно однакових рівнів зафіксованої початкової напруги  $u[t_0]$ .

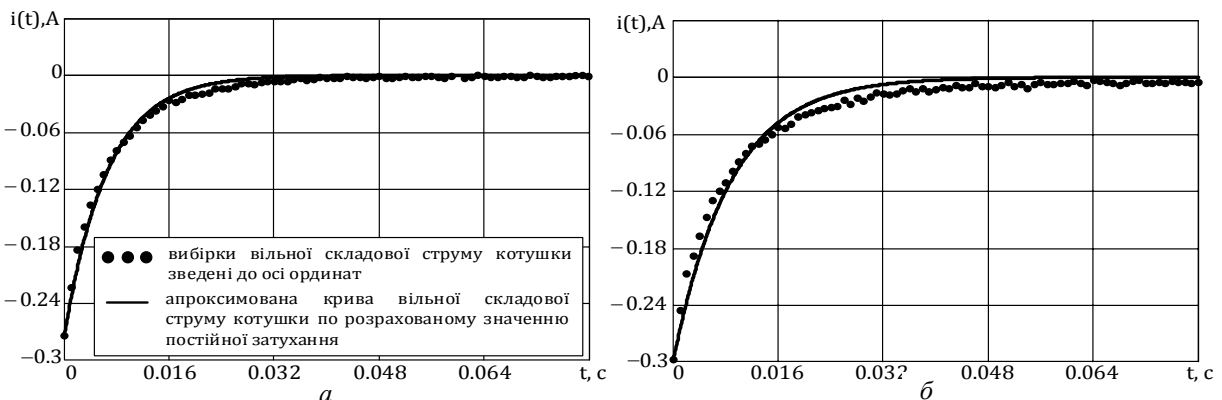


Рис. 6

Ведення бази даних є дуже важливою функцією моніторингу, оскільки накопичення в процесі експлуатації даних моніторингу, особливо у випадках поломок і відмов, з постійною їх обробкою сучасними методами злиття даних, з використанням нечіткої логіки та нейронних мереж надасть можливість розробки чітких критеріїв, відповідно до яких можна буде сформулювати судження про критичність відхилення того чи іншого показника моніторингу механічного стану вимикача і більш грамотно запобігти його пошкодженням чи відмовам.

**Висновки.** У результаті дослідження структури, фізичних процесів і функціонування блока керування та приводного механізму вимикача оцінено можливості окремих складових (етапів) процесів його вимкнення/вмикання і відповідних їм параметрів та характеристик в отриманні моніторингових даних про ТС вимикача.

На основі проведеного аналізу результатів цілого ряду головним чином закордонних досліджень, присвячених методам виявлення пошкоджень і відмов різних елементів ВВ, встановлено, що показниками моніторингу ТС ВВ можуть бути такі властивості (величини) їх механічних елементів:

- параметри струмів котушок вмикання/вимикання (амплітуди, початкові значення, миттєві значення, мінімальні значення, постійна часу затухання) і параметри кривої переміщення (руху) основних контактів (довжина шляху переміщення, постійна часу затухання);
- функціонали струмів котушок вмикання/вимикання (максимальні значення, діючі значення, похідні струмів);
- складові струмів котушок вмикання/вимикання (аперіодичні, гармонічні);
- параметри складових струмів котушок вмикання/вимикання (початкове значення і постійна часу затухання вільної складової);
- характер зміни струмів котушок вмикання/вимикання (усталений, аперіодичний, довільної форми, шум) і зміни (форма) кривої переміщення основних контактів та її окремих ділянок (усталений, коливальний, затухаючий);
- моменти часу, що пов'язані з деякими характерними точками кривих струмів котушок вмикання/вимикання (максимумів, мінімумів, різких змін), і моменти, пов'язані з деякими характерними точками кривої переміщення основних контактів (початок руху, закінчення руху контактів);
- часові інтервали, що відносяться до певних відрізків кривих струмів котушок вмикання/вимикання (зростання, спадання струму), та інтервали, що відносяться до певних відрізків кривої переміщення основних контактів (між моментами початку і закінчення руху, коливальний рух).

Аналіз відомих ПМ механічних елементів вимикача способів отримання виявив необхідність розширення та обґрунтування переліку ПМ та методів їх отримання з метою підвищення достовірності даних і якості моніторингу.

Розроблено метод та алгоритм визначення більш як 20-ти ПМ механічних елементів ВВ, що ґрунтується на використанні інформації, отримуваної в результаті комплексної обробки сигналів ініціації руху та кривої руху основних контактів, сигналів про положення додаткових контактів, струму.

1. Rubanenko O. E., Mysenko S. V. Implementation coordination and reliability insuring of SF6 circuit breakers under operation conditions. *Visnyk Khmelnytskogo Nacionalnogo Universytetu*. No. 1, 2013. Pp. 135–139. (Ukr)
2. Kutin V. M., Rubanenko O. E., Mysenko S. V. Determination of the technical state of high-voltage SF6 circuit breakers under operating conditions. *Visnyk Nacionalnogo Tekhnicheskogo Universytetu "Kharkivskogo Politeknicheskogo Instytutu"*. 2014. Issue 60. P. 57–67. (Ukr)
3. 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, № 3. P. 1354–1362. (Eng)
4. Johan H., Mousavi M. J. Coil current analysis method for predictive maintenance of circuit breakers : 2008 IEEE/PES *Transmission and distribution conference and exposition* (21-24 April 2008, Chicago, USA). Chicago, USA, 2008. P. 1–7. (Eng)
5. Rao P., Huang J., Hu X., Xiao J. Testing of breakers using coil current characteristics analysis : 2009 IEEE *International conference on control automation* (9-11 December 2009, Christchurch, New Zealand). Christchurch, New Zealand, 2009. (Eng)

6. Razi-Kazemi A. A., Vakilian M., Niayesh K., Lehtonen M. Circuit breaker automated failure tracking based on coil current signature. *IEEE Transaction on power delivery*. 2014. Vol. 29, № 1. P. 283–290. (Eng)
7. Scott M. S., Stephen D. J. McArthur, Bruce S., James R. McDonald, Angus C. Providing decision support for the condition-based maintenance of circuit breakers through data mining of trip coil current signatures. *IEEE Transaction on power delivery*. 2007. Vol. 22, № 1. P. 178–186. (Eng)
8. Fan Y., Xiaoqiang H. Research on the mechanical state parameter extraction method of high voltage circuit breakers : 10<sup>th</sup> IEEE International conference on industrial informatics (25-27 July 2012, Beijing, China). Beijing, China, 2012. P. 1062–1066. (Eng)
9. Rusek B., Balzer G., Holstein M., Claessens M.-S. Timings of high voltage circuit breaker. *Electric power systems research*. 2008. Vol. 78. P. 2011–2016. (Eng)
10. 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* (3-5 October 2016, Xi'an, China). 2016. P. 408–413. (Eng)
11. Watanabe T., Sugimoto T., Imagawa H. Chan K. K., Chew T. Y. Qin S. Z. Practical application of diagnostic method of circuit breaker by measuring three current waveforms: 2008 *International conference on condition monitoring and diagnosis* (21-24 April 2008, Chana, Beijing). Chana, Beijing, 2008. P. 398–401. (Eng)
12. Kezunovic M., Sevcik D. R. Automated circuit breaker monitoring and analysis : *IEEE Power engineering society summer meeting* (21-25 July 2002, Chicago, USA). Chicago, USA, 2002. P. 559–564. (Eng)
13. Razi-Kazemi A. A. Applicability of auxiliary contacts in circuit breaker online condition assessment. *Electric power systems research*. 2015. Vol. 128. P. 53–59. (Eng)

УДК 621.316.5

**А.В. Панов**, вед. инж., **В.И. Паньків**, асп., **М.Ф. Сопель**, докт. техн. наук, **Е.Н. Танкевич**, докт. техн. наук  
 Інститут електродинаміки НАН України,  
 пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

#### **УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ**

*На основе рассмотрения структуры, физических процессов и функционирования блока управления и приводного механизма высоковольтного выключателя выполнен анализ диагностических показателей и показателей мониторинга, а также способов их определения с точки зрения информативности, обоснованности и эффективности использования в системах он-лайн мониторинга выключателей. Предложены метод и алгоритм комплексного автоматического определения показателей мониторинга механических элементов выключателя, включая и ряд новых, предложенных в работе, показателей, касающихся катушек включения/выключения, таких как локальные экстремумы токов и соответствующие им моменты времени; активное сопротивление, индуктивность и постоянная времени затухания тока катушек. Библ. 13, рис. 6.*

**Ключевые слова:** высоковольтный выключатель, блок управления, приводной механизм, техническое состояние, мониторинг.

**A.V. Panov, V.I. Pankiv, M.F. Sopol, E.M. Tankevych**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
 Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

#### **MONITORING IMPROVEMENT OF TECHNICAL CONDITION OF HIGH-VOLTAGE CIRCUIT BREAKER MECHANICAL ELEMENTS**

*Based on the consideration of the structure, physical processes and functioning of the control unit and drive mechanism of the high-voltage circuit breaker, an analysis of the diagnostic indicators and indicators of monitoring and the methods of their determination from the point of view of information value, justification and efficiency of use in the circuit breaker on-line monitoring systems has been made. The method and algorithm of complex automatic determination of monitoring parameters of circuit breaker mechanical elements, including a number of new indicators which are offered in the paper, related to trip/close coils such as local extremes of currents and their corresponding time instants, active resistance, inductance and time constant of the coil current are proposed. References 13, figures 6.*

**Key words:** high-voltage circuit breaker, control unit, drive mechanism, technical condition, monitoring.

Надійшла 05.09.2018  
 Received 05.09.2018