УДК 681.518.3:621.316.57

ВИЗНАЧЕННЯ КОМУТАЦІЙНОГО РЕСУРСУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ

Б.С. Стогній[1], академік НАН України, **М.Ф. Сопель**[1], докт.техн.наук, **Л.Д. Третякова**[2], докт.техн.наук, **Є.М. Танкевич**[1], докт.техн.наук, **А.В. Панов**[1], **В.І. Паньків**[1]

[1] - **Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: av-panov@yandex.ru**

[2] - **Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.**

Досліджено сукупний вплив точності апроксимації ресурсної характеристики (РХ) і точності вимірювань миттєвих значень та розрахунку діючого значення струму вимкнення (СВ) високовольтного вимикача (ВВ) на точність визначення його комутаційного ресурсу (КР) у процесі експлуатації. Ґрунтуючись на результатах проведеної кількома способами апроксимації РХ вимикача за різної кількості заданих виробником її точкових значень, визначено умови, дотримання яких забезпечує задовільну з точки зору поставленої задачі, апроксимацію такої характеристики. На прикладі вимикача фірми ABB типу HPL 362 B1 показано, що одним із можливих шляхів підвищення точності і вдосконалення методики визначення КР ВВ є апроксимація його РХ кубічним сплайном та підвищення точності вимірювання миттєвих значень струмів КЗ у циклі вимкнення.

Бібл. 11, табл. 3, рис. 6.

Ключові слова: високовольтний вимикач, комутаційний ресурс, апроксимація, струм відключення, трансформатор струму.

Вступ. Високовольтні вимикачі належать до основного і найбільш важливого електрообладнання електроенергетичних систем (ЕЕС) і значною мірою впливають на надійність їхньої роботи. Функціонування цього обладнання у зв'язку з його характерною конструкцією колонкового типу, виконуваними функціями та місцем розміщення в ЕЕС супроводжується значними механічними напруженнями, а також небажаними електричними, тепловими та хімічними ефектами, які можуть змінюватися у дуже широких діапазонах і бути причиною зношення та пошкоджень вимикачів чи їхніх окремих компонентів і призвести до необхідності виведення їх з експлуатації. Тому моніторингу параметрів та стану цих апаратів приділяється велика увага [1, 3, 7-10].

Однією з найбільш зношуваних і пошкоджуваних частин вимикачів усіх виконань і типів (масляних, повітряних, вакуумних та елегазових) є дугогасні пристрої різних конструкцій, особливо їхні головні контакти. Основною причиною зношення і руйнування контактів є електрична дуга, що виникає між ними під час відключення струму. Серед факторів, які впливають на ерозію контактів вимикача, є тип матеріалу, їхня форма та розмір, матеріал заповнення дугогасної камери та його тиск, що встановлюються безпосередньо виробником при проектуванні та виготовленні вимикача [11]. На руйнування та зношення контактів впливають також і фактори, які є випадковими – параметри струму, який вимикається вимикачем, та тривалість горіння дуги в камері. Масштаби пошкоджень визначаються кількістю теплової енергії, що виділяється на контактах і дузі при проходженні через них СВ.

З метою забезпечення надійного функціонування цих апаратів і недопущення їхніх відмов з вказаних причин нормується, наприклад, як у стандарті [6], КР вимикачів, який належить до основних показників цих апаратів. Зазвичай КР подається заводами-виробниками у вигляді РХ, а саме – декількома числами $N_{ном}, N_1, N_2, ..., N_i, N_{в.ном}$, що представляють собою граничну кількість можливих циклів (операцій) відключення вимикачем різних за значенням струмів: номінального струму вимикача $I_{ном}$, номінального СВ $I_{в.ном}$ та кількох струмів $I_1, I_2, ..., I_i$ з проміжку між $I_{ном}$ та $I_{в.ном}$. Як правило, значення N подаються не більше як для чотирьох значень струму, з яких два, тобто I_1, I_2 – з проміжку між $I_{ном}$ та $I_{в.ном}$. Оскільки, практично, завжди струм КЗ через вимикач I_t знаходиться між двома вказаними його граничними значеннями $I_{ном}$ та $I_{оном}$ і є випадковою величиною, його значення майже ніколи не співпадає з вказаними в РХ вимикача. Визначення реального плинного КР в експлуатації потребує інтерполяції РХ. Звідси при оцінюванні плинного залишкового КР постає задача вибору методу інтерполяції РХ, застосування якого при заданій виробником мінімальній кіль-

© Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Третякова Л.Д., Танкевич Є.М., Панов А.В., Паньків В.І., 2017

кості точок РХ забезпечуватиме найвищу точність її апроксимації і точність визначення КР. Визначення залишкового КР вимикачів у процесі їхньої експлуатації є важливою науково-технічною задачею. Водночас використовувані при цьому методи контролю [1-3, 5] не враховують зазначені вище фактори, які впливають на значення КР, що призводить до похибки у його оцінюванні, а відповідно до зростання витрат на ремонт і реновацію вимикача.

Метою даної роботи є пошук і обґрунтування напрямків підвищення точності визначення залишкового КР ВВ на основі оцінювання впливу на результат розрахунку його значення методів і точності апроксимації РХ та точності вимірювання СВ.

Моделі та засоби визначення комутаційного ресурсу. Існує декілька підходів до визначення залишкового ресурсу вимикачів. Один із них ґрунтується на використанні статистичних даних про ймовірність числа і типів пошкоджень та суми струмів КЗ, які можуть бути вимкнені вимикачем без зниження показників якості [3].

Перші практичні спроби визначення ресурсу вимикачів зроблені у ВЕО «Вінницяенерго» у вигляді розрахунку числа допустимих відключень кожним вимикачем підстанції попередньо розрахованого найбільшого струму КЗ на її збірних шинах [1]. Велике розповсюдження свого часу для оцінювання залишкового КР отримало використання механічних, імпульсних та електронних лічильників числа спрацювань вимикача [3]. Проте усі ці підходи є недосконалими, оскільки в них ніяк не враховується вплив зазначених вище факторів ерозії контактів на КР.

З появою мікропроцесорного обладнання стало можливим впровадити ще один з підходів до визначення залишкового КР, який базується на використанні РХ вимикача. Так, у роботі [3] було запропоновано таку модель визначення залишкового КР в умовах експлуатації:

$$n = N_{ном} - \sum_{i=1}^{m} f(I_i), \tag{1}$$

де m – загальна кількість виконаних вимикачем циклів відключення; $f(I_i)$ – витрати КР вимикача при i-й комутації, які визначаються за його РХ.

Дещо складнішу модель такого оцінювання запропоновано в роботі [5]

$$n = N_{ном} I_{ном}{}^2 t_{ном} - \sum_{i=1}^{m} f(I_i) \int_{t_{кз_i}}^{t_{в_i}} i_i^2(t)dt, \tag{2}$$

де $t_{ном}$ – номінальна тривалість вимкнення струму $I_{ном}$; $t_{кз_i}$ та $t_{в_i}$ – моменти виникнення КЗ та його вимкнення відповідно; $\int_{t_{кз_i}}^{t_{в_i}} i_i^2(t)dt$ – умовна величина (інтеграл Джоуля), яка характеризує теплову дію струму КЗ на головні контакти вимикача.

Використання цієї моделі забезпечує набагато точніше оцінювання залишкового КР порівняно з моделлю (1), оскільки дозволяє враховувати не лише вплив технічних параметрів контактів та ізоляційного матеріалу в дугогасній камері, але й параметри СВ, тривалість горіння електричної дуги і теплоту, яку вона виділяє при вимкненні струмів нормальних режимів та струмів КЗ. Зазначимо, що використання моделей (1) і (2) потребує знання миттєвих і діючих значень СВ, одержання яких, особливо в перехідних режимах ЕЕС, пов'язано з певного роду труднощами. Тому оцінювання впливу точності вимірювання цих струмів у нормальних і перехідних режимах ЕЕС на результати визначення КР вимикача є другим питанням, яке досліджується в даній роботі.

Апроксимація РХ вимикача. Для апроксимації РХ використовують кусково-лінійні або експоненціальні функції [2] і поліноми різних степенів. Так, у [1] з цією метою використано поліном m-го степеня, де розрахунок коефіцієнтів апроксимації виконується шляхом застосування методу найменших квадратів (МНК). Про апроксимацію РХ поліномом третього степеня йдеться у [3], де коефіцієнти апроксимації отримані в результаті розв'язання системи лінійних рівнянь. Доцільність використання саме цих способів апроксимації в кожній із зазначених праць ніяк не обґрунтована, що породжує сумніви щодо правомірності їхнього застосування для різконерівномірних залежностей, якими є РХ. Отже, актуальною є задача обґрунтованого вибору найбільш простого, з обчислювальної точки зору, і точного способу апроксимації конкретної РХ чи розробки універсального способу з зазначеними властивостями.

Дослідження впливу точності апроксимації РХ на результат визначення КР виконаємо на прикладі елегазового ВВ типу HPL 362 B1 фірми АВВ з $I_{ном}$ =2000 А та $I_{в.ном}$ =50 кА. Його РХ зображена на рис. 1, *а* (логарифмічний масштаб) і на рис. 1, *б*.

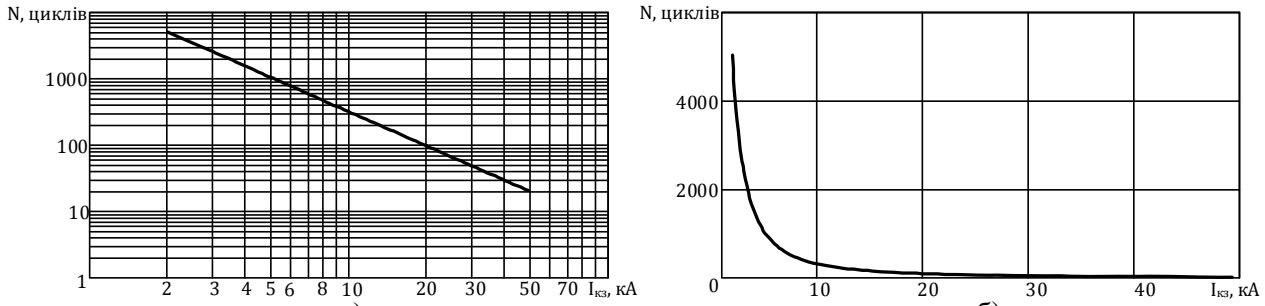

Рис. 1

Насамперед розглянемо випадок, коли РХ задано чотирма точками: 5000 можливих циклів відключень $I_{ном}$; 160 відключень 30%-го (15 кА) $I_{оном}$; 45 відключень 60%-ого (30 кА) $I_{оном}$; 20 відключень $I_{оном}$ (50 кА).

Апроксимацію РХ різними способами показано на рис. 2, де задіяні наступні позначення: *1* – реальний вигляд РХ; *2* – задані виробником вимикача точки, за якими здійснюється апроксимація; *3,4* – РХ, апроксимована відповідно поліномом третього степеня з визначенням коефіцієнтів апроксимації чисельним методом розв'язання системи лінійних рівнянь, поліномом третього степеня з визначенням коефіцієнтів апроксимації за допомогою МНК; *5* – РХ, апроксимована інтерполяційним кубічним сплайном.

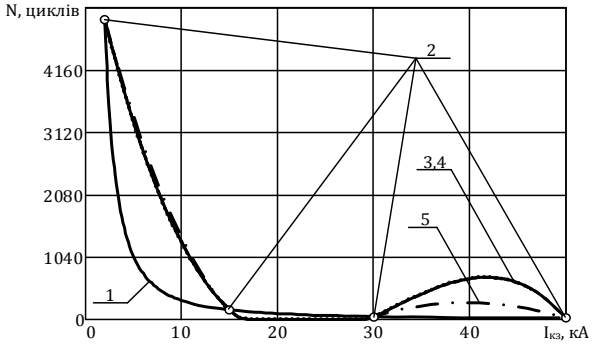

Рис. 2

Хоча кращою, як видно з рис. 2, з усіх розглянутих способів виглядає апроксимація РХ інтерполяційним кубічним сплайном, все ж у цілому слід визнати, що усі вони характеризуються низькою точністю через появу похибок апроксимації коливального характеру (осциляцій), причиною яких є різкозмінний характер РХ.

На рис. 3 (з такими самими позначеннями, як і на рис. 2) зображено апроксимації РХ для випадків, коли вона задана 6-ма (рис. 3, *а*) та 8-ма (рис. 3, *б*) точками. Це вказує на недостатність представлення РХ чотирма точками і недоцільність використання поліномів для її точної апроксимації.

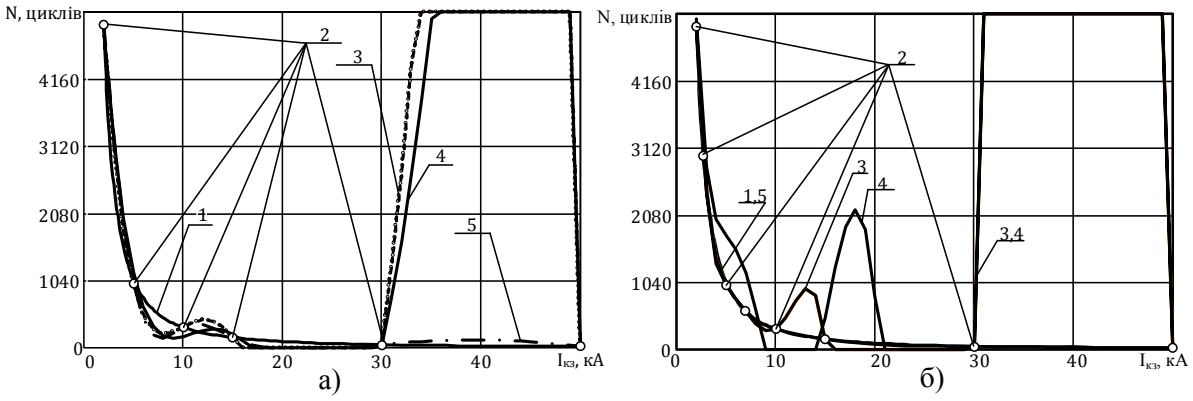

Рис. 3

Вимірювання струму в кожному циклі відключення. Використання моделей КР (1) і (2) потребує моніторингу струму шляхом виконання вимірювань миттєвих та визначення діючих значень СВ. У мережах напругою 330-750 кВ такий моніторинг здійснюється первинними вимірювальними каналами струму (ПВК) систем моніторингу технічного стану їхнього електричного обладнання і

параметрів режимів. Для визначення діючого значення струмів КЗ у [5] використано наступний вираз:

$$I = \frac{\max(i[l]) - \min(i[l])}{2\sqrt{2}}, \tag{3}$$

де $\max(i[l])$, $\min(i[l])$ – відповідно максимальне $i_{\max}$ та мінімальне $i_{\min}$ значення вибірок $i[l]$ миттєвого значення СВ впродовж часу вимкнення $\tau_в$ струму КЗ (рис. 4).

З рис. 4, який відображає відносну зміну у часі СВ $i(t)$, струму спрацювання релейного захисту (РЗ) $i_{рз}(t)$, струму котушки вимкнення $i_к(t)$, кривої руху головних контактів вимикача $S(t)$ та стану його блок-контактів видно, що операція відключення струму КЗ вимикачем починається в момент виникнення пошкодження $t_{кз}$ і закінчується в момент $t_в$ досягнення ним стабільного нульового значення $i(t) = 0$. На рис. 4 з метою більшої наочності тривалість СВ $i(t)$ вибрана довільно, через неможливість у даному разі подати деяке її конкретне значення, оскільки $\tau_в$ залежить від багатьох факторів, насамперед, від параметрів струму КЗ, алгоритмів захисту та часу його реакції $\tau_{рз}$ у конкретному випадку струму КЗ, конструктивних особливостей окремих вузлів вимикача (приводного механізму, контактної системи).

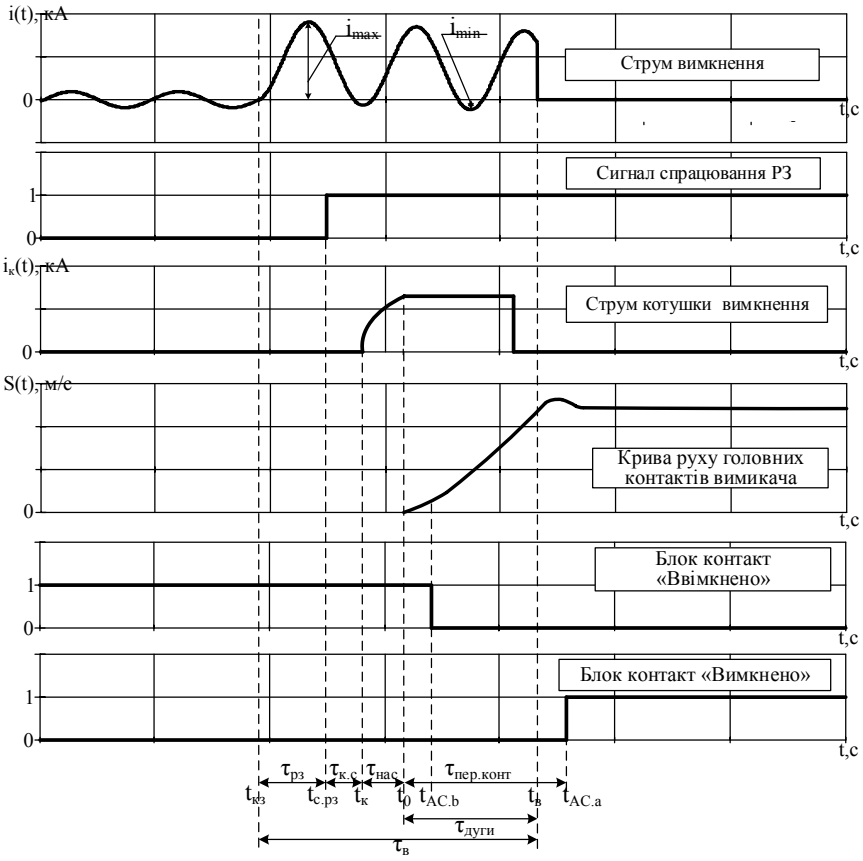

Рис. 4

З цього рисунка також видно, що за час $\tau_в$ відключення вимикачем струму КЗ, який складається з часу $\tau_{рз}$ дії РЗ, часу $\tau_{к.с.}$ формування керуючого сигналу колами керування вимикачем, часу $\tau_{нас}$ насичення котушки вимкнення та часу $\tau_{дуги}$ горіння дуги в дугогасній камері, через вимикач протікає струм, що може характеризуватися кількома максимальними $i_{\max}$ та мінімальними $i_{\min}$ миттєвими значеннями. Це може стати причиною значної додаткової похибки у визначенні діючого значення СВ, що буде показано нижче. Звідси виникає потреба в дослідженні інших способів розрахунку діючого значення СВ. Зокрема, відоме наступне співвідношення:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)dt} \approx \sqrt{\frac{\Delta t}{L}\sum_{l=0}^{L-1} i^2[l]}, \tag{4}$$

де $i[l]$ – l -а вибірка миттєвого значення струму, Δt – інтервал часу між моментами фіксації аналого-во-цифровими перетворювачами ПВК вибірок миттєвих значень струму $i[l]$; L – кількість вибірок миттєвого значення струму.

Проте у сучасних мікропроцесорних пристроях однією із найбільш використовуваних виразів для розрахунку діючого значення струму основної або його окремих вищих частот за вибірками $i[l]$ миттєвих значень є дискретні перетворення Фур'є такого вигляду:

$$\dot{I}[k] = \frac{\sqrt{2}}{L} \sum_{l=0}^{L-1} i[l] \cdot e^{-jl\frac{2\pi k}{L}},$$

де $\dot{I}$ – комплекс діючого значення струму; k – номер гармоніки струму.

У випадку несинусоїдального струму його повне діюче значення обчислюється наступним чином:

$$I = \sqrt{(I[0])^2 + (I[1])^2 + (I[2])^2 + ... + (I[k])^2}. \quad (5)$$

У загальному випадку струми високовольтних мереж крім складової основної частоти можуть також містити спектри вищих гармонік та високочастотного шуму, а при пошкодженнях у струмі КЗ можлива поява постійної (аперіодичної) складової струму. В такому разі СВ є сукупністю гармонік з випадковим законом зміни їхніх амплітуд та фаз і аперіодичної складової з випадковим законом зміни початкового значення та постійної часу згасання.

З наведених вище результатів досліджень випливає задача вибору найбільш прийнятного (в аспекті точності) розрахункового виразу для визначення діючого значення I_1 СВ вимикача при моніторингу його КР. З метою розв'язання цієї задачі в роботі спочатку виконані розрахунки можливих, найбільш характерних за складом та формою СВ та їхніх діючих значень за формулами (4) і (5), результати яких подані на рис. 5. Зазначимо, що в цих розрахунках похибки ТС не враховувалися.

Рис. 5 демонструє наступні випадки СВ: а) ідеального синусоїдального струму; б) синусоїдального струму з певним вмістом ВГ (з 2-ї по 7-му); в) струму симетричного КЗ; г) струму КЗ з максимальною аперіодичною складовою. Розрахунки діючого значення струму виконувалися рекурсивним методом з частотою дискретизації струмів 3200 Гц (64 вибірки за період). За вікно даних для формул (4) та (5) також були прийняті 64 вибірки, отже показані на рис. 5 перші діючі значення струмів I_1 отримувалися в кінці першого періоду від початку їхнього моделювання.

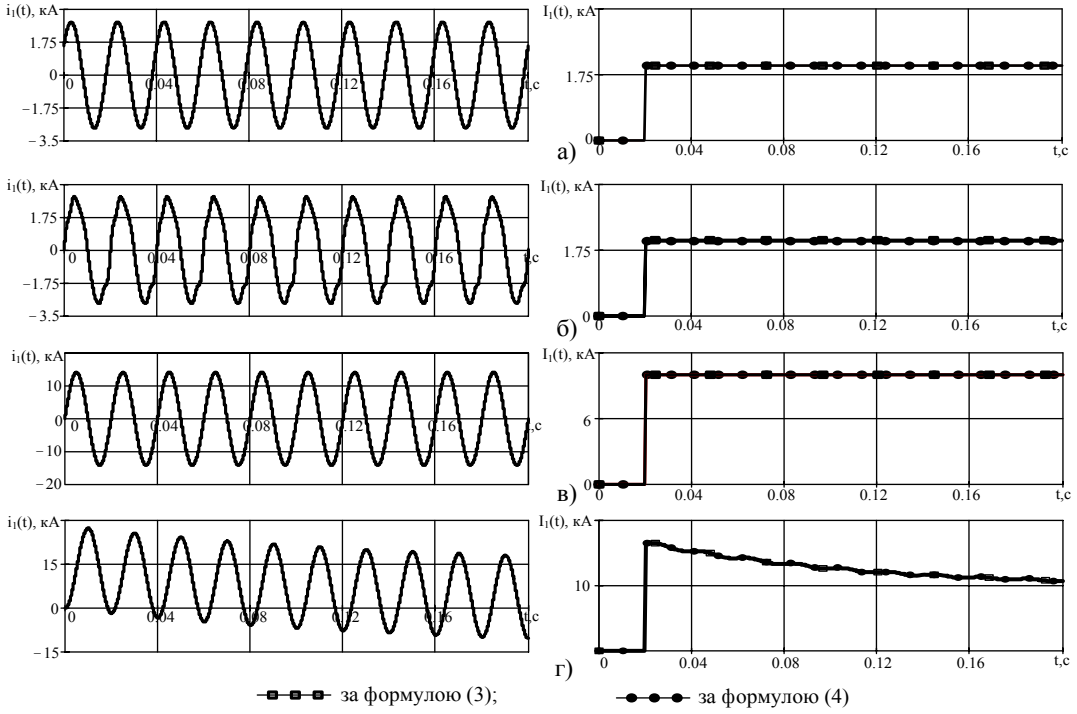

Рис. 5

Аналізуючи рис. 5, приходимо до висновку, що в усіх розглянутих випадках формули (4) та (5) є придатними для оцінки діючого значення повного струму, хіба що розрахунок за моделлю (5), тобто з використанням ДПФ, потребує дещо більших обчислювальних затрат.

Як відомо, аперіодична складова струму КЗ може бути причиною насичення магнітопроводів трансформаторів струму (ТС), зростання їхніх похибок, похибок ПВК у цілому і відповідно зниження точності вимірювання струму та оцінювання КР вимикача за моделями (1) і (2). До того ж процес зміни такого СВ, особливо впродовж часу горіння дуги, не є стаціонарним і використання в цьому ра-

зі моделей (4) і (5) збільшуватиме похибку визначення діючого значення струму. Отже, далі розглянемо задачу вибору моделі визначення діючого значення СВ при моніторингу КР за умов урахування похибок ТС, який у цьому дослідженні представлений математичною моделлю, побудованою на основі теорії феромагнітного гістерезису Джайлса-Атертона [4].

На рис. 6, *а* показано результати розрахунку кривої $i_2(t)$ вторинного струму ТС за умов насичення його магнітопроводу аперіодичною складовою первинного струму $i_1(t)$ (струму електромережі, тобто СВ) до і після виникнення КЗ в ЕЕС, що сталося в момент проходження струму $i_1(t)$ через нульове значення. Рис. 6 відображає результати рекурсивного розрахунку I_1 за формулами (4) та (5) відповідно.

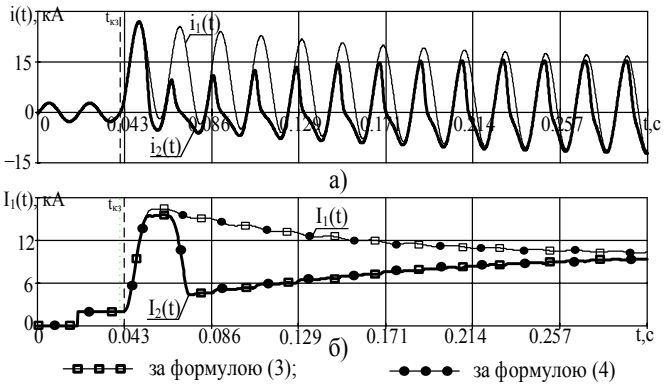

Рис. 6

Проаналізувавши рис. 6, бачимо, що у цьому випадку струм $i_2(t)$ ТС є доволі спотвореним і характеризується не лише несиметрією, але і значною нестаціонарністю. Результати розрахунків діючих значень обох струмів за формулами (4) та (5) співпадають, що свідчить про рівноправну можливість застосування кожної з них для оцінки діючого значення повного струму. Проте, як видно з рис. 6, *б*, у зоні насичення магнітопроводу ТС часові залежності струмів I_2 та I_1 значно різняться між собою. Оскільки при визначенні КР у формулах (1) і (2) у дійсності використовуються значення вторинного струму ТС, то це зумовлює додаткову похибку в оцінюванні КР вимикача.

Для порівняння в табл. 1 подано результати розрахунків діючого значення повного СВ у числовому вираженні для всіх п'яти розглянутих випадків струму з використанням у кожному з них для визначення його діючого значення досліджуваних формул (3), (4) та (5). У верхній частині рядка таблиці, що стосується рис. 6, подано діючі значення I_1 первинного струму ТС, а у нижній – діючі значення I_2 його вторинного струму.

Таблиця 1

Досліджуваний випадок СВ	Врахування похибок ТС	Діюче значення струму основної частоти, задане при моделюванні, кА	Діюче значення повного СВ, розраховане за формулою, кА		
			(3)	(4)	(5)
Рис. 5, *а*	Ні	2	1.999	2	2
Рис. 5, *б*	Ні	2	2.006	2.008	2.007
Рис. 5, *в*	Ні	10	10	10	10
Рис. 5, *г*	Ні	10	13.36	16.599	16.595
Рис. 6	Так	10	13.722	16.392	16.391
			13.843	15.582	15.576

При моделюванні у випадках рис. 5, *г* та рис. 6 діюче значення струму основної частоти задавалось рівним 10 кА, фаза виникнення пошкодження рівною 0°, що викликало появу максимальної аперіодичної складової струму.

Дані табл. 1 свідчать, що аперіодична складова струму КЗ спричинює значний вплив на точність визначення повного діючого значення СВ. Визначення діючого значення СВ з аперіодичною складовою за формулою (3) є найбільш неточним, що вказує на непридатність її застосування. Формули (4) і (5) показують приблизно однакові результати у всіх розглянутих випадках і є більш точними, проте не дозволяють враховувати похибки ТС. Звідси виникає потреба розробки точної моделі визначення діючого значення вторинних струмів ТС у випадку насичення його аперіодичною складовою струму КЗ.

Моделювання життєвого циклу вимикача з використанням ресурсної характеристики. Оскільки на сьогодні при моніторингу КР використовуються моделі (1) і (2), дослідимо вагомість впливу методів апроксимації РХ вимикача та точності обчислення діючого значення СВ на точність визначення КР. Відомо, що в експлуатації у переважній більшості випадків (зміна конфігурації мережі, виконання планово-ремонтних та випробувальних робіт і т.п.) ВВ вимикають струми нормального режиму електромережі (20-120% від $I_{ном}$), що становлять близько 80% усіх виконуваних ними операцій, та струми різних видів КЗ, що відрізняються амплітудою, сталою часу та моментом виникнення пошкодження. Частка останніх не перевищує 20%.

Виходячи з цього, як приклад для наглядного показу як працюють моделі (1) та (2) визначення КР вимикача, у подальшому дослідженні для вибору множини досліджуваних СВ з використанням генератора випадкових величин була генерована послідовність СВ, що складається з 30 величин. Серед них відповідно до зазначеного вище відсоткового співвідношення 24 випадки відключень струмів нормальних режимів з випадковими діючими значеннями в діапазоні 20-120% від $I_{ном} = 2$ кА та шість випадків струму КЗ з випадковими значеннями амплітуд (кратністю 1,2-10 $I_{ном}$), сталими часу 0,05-0,3 с і фазами виникнення пошкодження з діапазону 0-180°. Аналіз згенерованої послідовності значень СВ показав, що насичення ТС відбулося тільки у двох випадках. В одному з них при струмі КЗ, який згасає зі значною сталою часу, що дорівнює 0,254 с, а в другому – при струмі КЗ з кратністю 7,5 з початковою фазою, що дорівнює 178,6°. При моделюванні прийнято, що час відключення нормального струму вимикачем у всіх випадках є сталим і становить 0,4 с, а час відключення струму КЗ дорівнює 0,6 с. У випадках відключення струмів нормальних режимів похибками ТС (його параметри подані в [4]) знехтувано, а при відключенні струмів КЗ похибки ТС враховувалися.

У табл. 2 подано результати розрахунку залишкового КР (у циклах) за його моделлю (1) для усіх 30-ти випадків моделювання СВ з використанням усіх розглянутих вище методів апроксимації РХ вимикача та різних моделей визначення діючого значення струму як у разі нехтування похибками ТС, так і з їхнім урахуванням.

Таблиця 2

Метод апроксимації РХ	Розрахунок діючого значення струму за формулою	Врахування похибок ТС	Комутаційний ресурс, цикл														
			Номер розрахункового випадку струму відключення														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Поліномом 3-го степеня	(3)	Ні	4999	4998	4997	4996	4995	4993	4992	4991	4990	4988	4987	4995	4994	4993	4992
		Так	4999	4998	4997	4996	4995	4993	4992	4991	4990	4988	4987	4995	4994	4993	4992
Кубічним сплайном	(4)	Ні	4999	4998	4997	4996	4995	4993	4992	4991	4990	4986	4985	4951	4950	4949	4948
		Так	4999	4998	4997	4996	4995	4993	4992	4991	4990	4986	4985	4951	4950	4949	4948
			16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Поліномом 3-го степеня	(3)	Ні	5005	5015	5014	5013	5020	5019	5018	5016	5015	5014	4997	4996	4995	4994	4993
		Так	5004	5015	5014	5013	5020	5018	5017	5016	5015	5014	4997	4996	4995	4993	4992
Кубічним сплайном	(4)	Ні	4926	4904	4903	4902	4811	4810	4809	4808	4807	4806	4792	4791	4790	4789	**4788**
		Так	4927	4905	4904	4903	4881	4880	4879	4878	4877	4876	4862	4861	4860	4859	**4858**

З наведених у табл. 2 даних витікає, що найточнішим варіантом визначення залишкового КР слід вважати випадок з використання кубічного сплайну для апроксимації РХ, з вимірюванням СВ ідеальним ТС, тобто без похибок, та з розрахунком діючого значення струму за формулою (4). У такому разі залишковий КР вимикача після виконання ним 30 циклів вимкнення (з них шість циклів вимкнення струмів КЗ) становить 4788 циклів відключення $I_{ном}$. У разі врахування похибок ТС, тобто за реальних умов моніторингу, залишковий КР становить 4858 циклів вимкнення $I_{ном}$. Це означає,

що ТС впродовж виконання вимикачем 30 операцій відключення струму вніс похибку в оцінку залишкового КР у 70 циклів. Це порівняно незначна похибка, проте в процесі подальшої експлуатації вона буде зростати, що призведе до необхідності передчасного виведення вимикача з експлуатації для ремонту і заміни його головних контактів. У цьому можна переконатися, збільшуючи в розглянутому прикладі число членів генерованої послідовності СВ.

Ще більш показовим є порівняння результатів оцінювання КР за моделлю (1) і за показами звичайного механічного лічильника комутацій вимикача. Зокрема, після виконання вимикачем усього лише 30 циклів (у цьому прикладі) вимкнення струмів КР за показами лічильника склав би 4970 циклів, а у випадку використання моделі (1) і нехтування похибками ТС він становить 4788 циклів, а з урахуванням цих похибок – 4858, що відповідно на 182 і 112 циклів менше КР обчисленого за показами лічильника.

Дані табл. 2 також свідчать, що використання полінома 3-го степеня для апроксимації РХ теж вносить значні похибки в розрахунок залишкового КР. Так, зокрема, після здійснення кожного з 16-го по 25-й цикли розрахований залишковий КР вимикача перевищує його максимальне, вказане заводом-виробником значення, а саме – 5000 циклів. Причиною цього є поява осциляцій на ділянках РХ з неточною апроксимацією.

Результати розрахунку залишкового КР вимикача у цикл $кА^2 \cdot с$ за моделлю (2) за таких самих, як і в попередньому розрахунку, вихідних даних подано в табл. 3. Як вже було відзначено, ця модель за своєю суттю є точнішою за модель (1), оскільки враховує не тільки вплив сили струму, а і його тривалість на зношення контактної системи вимикача.

Таблиця 3

Метод апроксимації РХ	Розрахунок діючого значення струму за формулою	Врахування похибок ТС	Комутаційний ресурс, цикл·$кА^2$·с														
			Номер розрахункового випадку струму відключення														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Поліном 3-го степеня	(3)	Ні	149999	149999	149998	149996	149995	149992	149991	149991	149991	149974	149973	150751	150751	150751	150749
		Так	149999	149999	149998	149996	149995	149992	149991	149991	149991	149974	149974	150478	150478	150478	150476
Кубічний сплайн	(4)	Ні	149999	149999	149998	149997	149996	149993	149992	149992	149991	149958	149957	146806	146806	146806	146804
		Так	149999	149999	149998	149997	149996	149993	149992	149992	149991	149960	149960	147905	147904	147904	147903
			16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Поліном 3-го степеня	(3)	Ні	151819	152702	152702	152702	153782	153779	153779	153777	153776	153774	152971	152970	152968	152966	152966
		Так	151521	152387	152387	152387	153163	153160	153159	153157	153157	153154	152368	152367	152365	152363	152363
Кубічний сплайн	(4)	Ні	144951	143032	143032	143032	129105	129102	129102	129100	129100	129098	128487	128446	128444	128443	**128443**
		Так	146085	144234	144233	144233	141833	141830	141830	141828	141828	141826	141189	141188	141187	141185	**141185**

Як і у випадку дослідження моделі (1), з даних табл. 3 витікає, що найточнішим є розрахунок з використанням кубічного сплайну для апроксимації РХ, вимірювання СВ ідеальним ТС з розрахунком його діючого значення за формулою (4).

Як видно з табл. 3, КР вимикача після виконання ним 30 циклів вимикання струмів становить 128443 цикл·$кА^2$·с. У випадку врахування похибок ТС, тобто за умов використання в розрахунках як СВ вторинного струму ТС, КР вимикача становитиме 141185 цикл·$кА^2$·с, що на 8,5% є більшим його фактичного значення 128443 цикл·$кА^2$·с. Відзначимо, що ця похибка визначення КР залежить не тільки від задіяної в розрахунках моделі діючого значення СВ, але й інтегралу квадрату цього струму, який за умов насичення ТС є значно недооціненим.

Висновки. За результатами експериментально-розрахункових досліджень встановлено, що точна апроксимація РХ ВВ можлива за умов, якщо вона буде виконуватися інтерполяційним кубічним сплайном, а РХ буде задано не менш ніж вісьмома рівномірно розміщеними вздовж всієї РХ точками.

Для розрахунків діючого значення різних за складом та характером СВ вимикача за вибірками їхніх миттєвих значень як для струмів усталених режимів, так і струмів перехідних режимів ЕЕС підтверджена правомірність застосування класичної моделі визначення середньо-квадратичного значення струму та дискретних перетворень Фур'є. З проведених досліджень витікає, що у випадку насичення магнітопроводу ТС актуальною є задача пошуку точного методу визначення діючого значення його нестаціонарного вторинного струму.

На основі виконаного кількісного оцінювання сукупного впливу точності апроксимації РХ, точності вимірювання миттєвих значень СВ в усталених і перехідних режимах ЕЕС та розрахунку їхніх діючих значень на точність визначення КР вимикача обґрунтовано доцільність використання моделі КР (2). Вдосконалено методику визначення КР, яка дозволяє враховувати не лише дію СВ, але і його тривалість на зношення контактної системи вимикача. Це сприятиме підвищенню надійності функціонування та економічності експлуатації ВВ.

1. *Грабко В.В.* Методы и средства технической диагностики выключателей больших электрических токов: дис. канд.техн.наук: 05.11.16. – Винница, 1990. – 174 с.

2. *Минкина И.С., Романов А.А.* Алгоритм оценки остаточного ресурса выключателя // Электрические станции. – 2004. – № 12. – С. 58-62.

3. *Рогоза В.В., Сопель М.Ф., Чернякин В.П., Лесновская С.Л.* Алгоритм определения остаточного ресурса выключателей // Автоматизация и релейная защита в энергосистемах. Сб. науч. трудов. – 1992. – С. 167-170.

4. *Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Паньків В.І., Танкевич Є.М.* Математична модель трансформатора струму на основі теорії феромагнітного гістерезису Джайсла-Атертона // Технічна електродинаміка. – 2016. – № 3. – С. 1-8.

5. *Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Максимчук В.Ф., Тутик В.Л., Михайлевський О.С., Панов А.В., Стасюк О.І., Тарасевич П.Й., Войтов Д.В.* Мікропроцесорна система моніторингу і прогнозу залишкового ресурсу елегазових високовольтних вимикачів. Пат. 73398 Україна, МПК G 07 C 3/10. Опубл. 25.09.2012. Бюл. №18.

6. ГОСТ 4.176-85. Система показателей качества продукции. Аппараты электрические высоковольтные. Номенклатура показателей. – Москва: Издательство стандартов, 1986. – 17 с.

7. *De Grijp M.H.B., Bedet J.S., Hopkins R.A.* Greyling Condition monitoring of high voltage circuit breakers // IEEE 4th AFRICON Conference in Africa, University of Stellenbosch (South Africa). – September 25-27, 1996. – Pp. 880-885.

8. *Fan Y., Chenxi Q., Xiaohui Z., Jun D., Xiaoguang H.* Integrated state test system of high voltage circuit breackers based on embedded technology // 2011 6th IEEE Conference on industrial electronics and applications (ICIEA), Beijing (China). – June 21-23, 2011. – Pp. 1605-1609.

9. *Jeyaraj S.G., Habtay Y.* Effective and efficient circuit breaker analysis // IET Conference on reliability of transmission and distribution networks (RTDN 2011), London (United Kingdom). November 22-24, 2011. – Pp. 157-162.

10. *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 (ICIEA), Beijing (China). – June 21-23, 2011. – Pp. 537-541.

11. *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 (IPMHVC), Santa Fe (New Mexico, USA). – June 1-5, 2014. – Pp. 466-469.

УДК 681.518.3:621.316.57

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОММУТАЦИОННОГО РЕСУРСА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Б.С. Стогний[1], академик НАН Украины, **М.Ф. Сопель**[1], докт.техн.наук, **Л.Д. Третьякова**[2], докт.техн.наук, **Е.Н. Танкевич**[1], докт.техн.наук, **А.В. Панов**[1], **В.И. Панькив**[1]

[1] - **Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина, e-mail: av-panov@yandex.ru**

[2] - **Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.**

Исследовано совместное влияние точности аппроксимации ресурсной характеристики и точности измерения мгновенных значений и расчёта действующего значения тока отключения высоковольтного выключателя на

точность определения его коммутационного ресурса в процессе эксплуатации. Исходя из результатов выполненной несколькими способами аппроксимации ресурсной характеристики выключателя при разном количестве заданных производителем её точечных значений, определены условия, выполнение которых обеспечивает удовлетворительную с точки зрения поставленной задачи аппроксимацию такой характеристики. На примере выключателя фирмы ABB типа HPL 362 B1 показано, что одним из возможных направлений повышения точности и усовершенствования методики определения коммутационного ресурса выключателя является аппроксимация его ресурсной характеристики кубическим сплайном и повышение точности измерения мгновенных значений токов короткого замыкания в цикле отключения. Библ. 11, табл. 3, рис. 6.
Ключевые слова: высоковольтный выключатель, коммутационный ресурс, аппроксимация, ток отключения, трансформатор тока.

EVALUATION OF HIGH-VOLTAGE CIRCUIT BREAKER INTERRUPTION RESOURCE

B.S. Stognii[1], M.F. Sopel[1], L.D. Tretiakova[2], E.M. Tankevych[1], A.V. Panov[1], V.I. Pankiv[1],
[1] - Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: av-panov@yandex.ru
[2] - National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

The overall effect of precision of interruption curve approximation, accuracy of current measurement and evaluation of root-mean-square value of circuit breaker interrupted current on precision its switching resource under condition was investigated. Based on the results of several ways of approximation of interruption curve of circuit breaker, using different amount of points, given by manufacturer, the conditions of qualitative and accurate approximation of such curve were identified. ABB HPL 362 B1 circuit breaker was considered as example and it was shown that one of the possible ways to increase the accuracy and improve technology of circuit breaker interruption resource evaluation is its resource curve approximation by using cubic spline and improving the accuracy of measurement of instantaneous values of fault currents in the period of interruption of fault currents. References 11, tables 3, figures 6.
Keywords: high-voltage circuit breaker, interruption resource, approximation, interrupted current, current transformer.

1. *Grabko V.V.* Methods and means of technical diagnostics of circuit breakers of large electric currents: thesis doctor of Philosophy: 05.11.16. – Vinnitsa, 1990. – 174 p. (Rus)

2. *Minkin I.S., Romanov A.A.* Algorithm assessment of residual resource of circuit breakers // Elektricheskie stantsii. – 2004. – No 12. – Pp. 58-62. (Rus)

3. *Rogoza V.V., Sopel M.F., Cherniakin V.P., Lesnovska S.L.* The algorithm for calculation of residual life of circuit breakers // Avtomatizatsiia i releinaia zashchita v energosistemakh. Sbornik nauchnykh trudov. – 1992. – Pp. 167-170. (Rus)

4. *Stognii B.S., Sopel M.F., Pankiv V.I., Tankevich E.M.* Current transformer mathematical model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2016. – No 3. – Pp. 1-8. (Ukr)

5. *Stognii B.S., Sopel M.F., Maksymchuk V.F., Tutyk V.L., Mychaylevski O.S., Panov A.V., Stasiuk O.I., Tarasevych P.Y., Voitov D.V.* Microprocessor system for monitoring and prediction of interruption resource of SF_6 high-voltage circuit breaker. Pat. 73398 Ukraine, МПК G 07 C 3/10. 2012. (Ukr)

6. GOST 4.176-85. System of product-quality indices. High-voltage electrical apparatus. Nomenclature of indices. – Moskva: Izdatelstvo Standartov, 1986. – 17 p. (Rus)

7. *De Grijp M.H.B., Bedet J.S., Hopkins R.A.* Greyling Condition monitoring of high voltage circuit breakers // IEEE 4th AFRICON Conference in Africa, University of Stellenbosch (South Africa). – September 25-27, 1996. – Pp. 880-885.

8. *Fan Y., Chenxi Q., Xiaohui Z., Jun D., Xiaoguang H.* Integrated state test system of high voltage circuit breackers based on embedded technology // 2011 6th IEEE Conference on industrial electronics and applications (ICIEA), Beijing (China). – June 21-23, 2011. – Pp. 1605-1609.

9. *Jeyaraj S.G., Habtay Y.* Effective and efficient circuit breaker analysis // IET Conference on reliability of transmission and distribution networks (RTDN 2011), London (United Kingdom). – November 22-24, 2011. – Pp. 157-162.

10. *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 (ICIEA), Beijing (China). – June 21-23, 2011. – Pp. 537-541.

11. *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 (IPMHVC), Santa Fe (New Mexico, USA). – June 1-5, 2014. – Pp. 466-469.

Надійшла 15.09.2016
Остаточний варіант 09.12.2016