



## АВТОМАТИКА ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 681.518.22:621.316.57

<https://doi.org/10.31713/vt1202510>

**Мандзюк Р. В., аспірант, Древецький В. В., д.т.н., Христюк А. О., к.т.н.**  
(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

### РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИПРОБУВАНЬ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ

**В роботі представлено розробку цифрової інтелектуальної системи випробувань високовольтних вимикачів, що складається з програмного забезпечення проведення вимірювань параметрів, та плати управління для збору інформації при проведенні вимірювань. Наведена система дозволяє автоматизувати процес випробувань високовольтного обладнання. Розроблено алгоритми управління, які автоматично регулюють параметри тестувань в реальному часі на основі зібраних даних про стан обладнання та результатів попередніх випробувань. Розроблені методи та технології дозволять вчасно виявляти потенційні проблеми в високовольтному обладнанні та запобігати аварійним ситуаціям у високовольтних електричних мережах.**

**Ключові слова:** високовольтний вимикач; випробовування; інтелектуальна система; лабораторна установка.

#### **Вступ**

Вимикач є складним елементом енергосистеми, що складається з таких основних компонентів: самого вимикача, роз'єднувачів, вимірювальних трансформаторів, шин, а також пристроїв захисту та автоматики [1].

Головними завданнями діагностування вимикачів є визначення технічного стану електрообладнання з урахуванням змінних експлуатаційних впливів; виявлення потенційно небезпечних дефектів; прогнозування залишкового ресурсу в реальному часі. Існує велика кількість параметрів високовольтних вимикачів, однак при діагностуванні визначаються ті, що регламентуються нормативною та заводською документацією [2–3].

Якість роботи контактної системи вимикачів визначається сукупністю основних часових параметрів: часом включення та

відключення, різночасністю включення фаз, тривалістю та характером брязкоту контактів. Ці параметри мають суворо контролюватися в умовах експлуатації для відповідності допустимим значенням. Важливо зазначити, що робота вимикача залежить від стану його механічних частин, коректності регулювань і налаштувань, ступеня зносу та наявності дефектів, точності виготовлення деталей і якості складання на заводі-виробнику [4].

Основним показником несправності вимикача є частота відмов, яка розраховується як відношення загальної кількості всіх видів відмов за період експлуатації до загального ресурсу вимикачів [5].

Збільшення потоку відмов вітчизняних вимикачів можна пояснити такими факторами: високою часткою масляних вимикачів напругою 110 кВ у загальному використанні; частою роботою пристроїв у непередбачених режимах; низькою якістю модульних вимикачів через недостатній обсяг приймальних випробувань; зниженням експлуатаційної надійності вимикачів, що перебувають у використанні понад 16 років [6].

**Основний матеріал.** Метою дослідження є створення програмного та апаратного забезпечення, яке може автоматизувати процес випробувань високовольтного обладнання. Важливим є покращення ефективності та точності випробувальних процесів, щоб забезпечити високу достовірність даних та зменшити час, необхідний для випробувань. Дослідження спрямовано на розробку методів та технологій, які дозволять вчасно виявляти потенційні проблеми в високовольтному обладнанні та запобігати аварійним ситуаціям. Розробка алгоритмів управління, які автоматично регулюють параметри тестувань в реальному часі на основі зібраних даних про стан обладнання та результатів попередніх випробувань. Проведення порівняльного аналізу між стандартними методами випробувань та запропонованим оптимізованим процесом з використанням інтелектуальної системи з метою визначення покращень у часі, точності та надійності вимірювань.

Об'єктом дослідження в цій роботі є високовольтні вимикачі (рис. 1), що забезпечують важливу роль в роботі високовольтних підстанцій та мереж, призначених для використання в розподільних пристроях середньої напруги об'єктів інфраструктури та промислових підприємств для включення та відключення під навантаженням електричних кіл у нормальних режимах роботи та для автоматичного відключення при КЗ.



Рис. 1. Високовольтний вимикач

Виконуючи роль виконавчих механізмів в автоматизованих енергетичних системах вони також використовуються для розподілу та перенаправлення потоків в умовах дефіциту електричної енергії. Таким чином, від їх надійності та ефективності залежить безперебійна робота електричних мереж, безпека споживачів електроенергії та самих об'єктів енергопостачання [7–8].

В результаті проведених досліджень нами розроблено схему інтелектуальної системи (рис. 2) та поставлено вимоги для проведення процесу випробувань, як-от:

1. Вимірювання струму.
2. Вимірювання напруги.
3. Вимірювання часу розмикання.
4. Перевірка мінімальної напруги спрацювання приводів вимикача.
5. Різномісність ввімкнення.
6. Хід контактів вакуумної камери.
7. Дотяг контактів.
8. Швидкість ввімкнення.

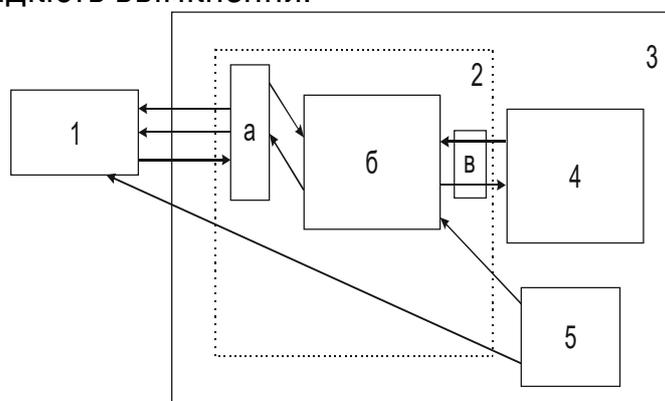


Рис. 2. Структурна схема інтелектуальної системи випробування високовольтних вимикачів

Структурна схема включає в собі наступні елементи:

1. Високовольтний вимикач;
2. Периферійний пристрій;
  - 2.а Підсистема вводу/виводу.
  - 2.б Обчислювальний пристрій.
  - 2.в Блок перетворення інтерфейсів.
3. Інтелектуальна система випробувань високовольтних вимикачів.
4. ПК обробки вимірювальної інформації.
5. Блок живлення.

Інтелектуальна система випробування високовольтних вимикачів (3) являє собою програмно-апаратну інформаційно-вимірювальну систему з модульною структурою та передбачає периферійну мікропроцесорну частину (2) і використання ПК (4) для обробки вимірювальної інформації.

Високовольтний вимикач (1) через його полюси підключається до підсистеми вводу/виводу (2, а) периферійного пристрою (2). Ця підсистема також забезпечує взаємозв'язок обчислювального пристрою (2, б) з давачами, що додатково підключаються до вимикача та служить для аналого-цифрового перетворення первинної вимірювальної інформації про стан вимикача та здійснення керуючих впливів на нього. Периферійна мікропроцесорна частина працює в режимі реального часу з метою оперативного моніторингу стану та характеристик вимикача у перехідних режимах. Після закінчення перехідних процесів у вимикачі, пакети інформації передаються через блок перетворення інтерфейсів (2, в) на ПК для подальшої обробки за допомогою інтелектуальних алгоритмів з метою оцінки якості виробу, та відображення інформації у зручній для оператора формі і подальшим архівуванням. Для забезпечення живленням усієї інтелектуальної системи випробування високовольтних вимикачів, а також самого вимикача використовується блок живлення (5).

Таким чином, розроблена нами структурна схема в подальшому дасть можливість створення інтелектуальної системи випробування високовольтних вимикачів, що розширить контроль їх робочих характеристик як під час виготовлення, так і в процесі використання.

На основі запропонованої структури виготовлено робочу лабораторну установку для проведення випробувань високовольтних вимикачів (рис. 3), та проведено випробування на підприємстві, що безпосередньо виготовляє високовольтні вимикачі напругою 6–



110 кВ.

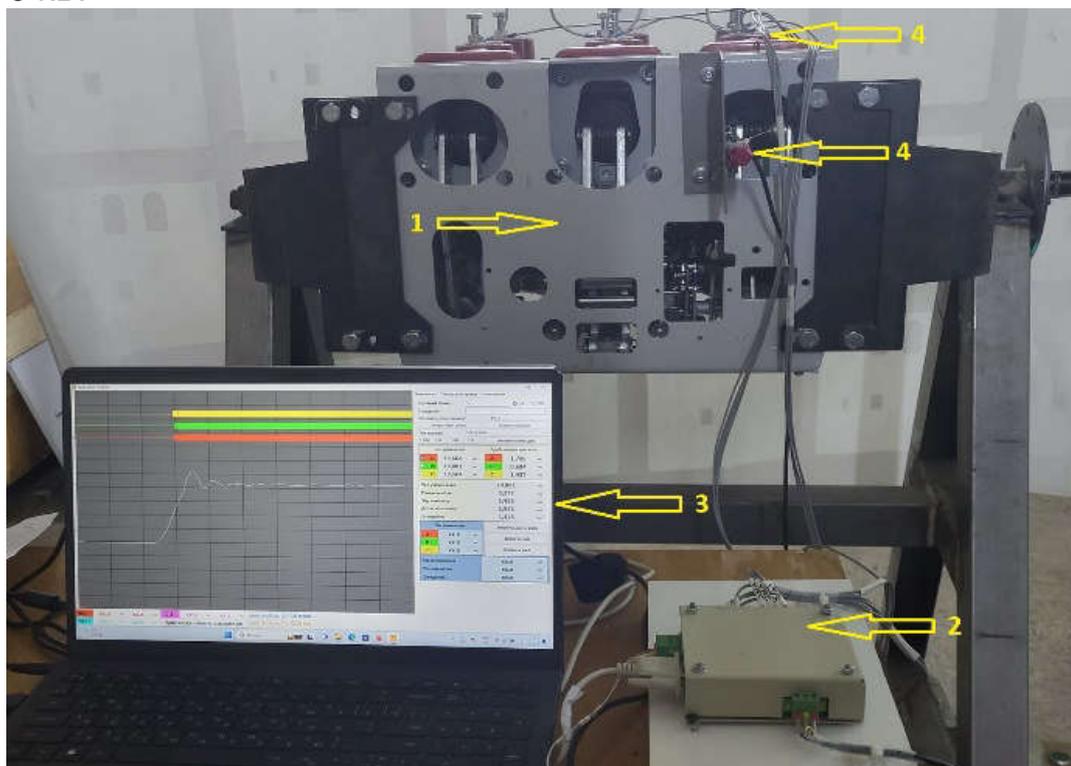


Рис. 3. Цифрова система випробувань високовольних вимикачів

Розроблена цифрова система випробувань високовольних вимикачів містить:

1. Об'єкт дослідження – вимикач вакуумний типу ВРС-10.
2. Плата управління цифровою системою випробувань на основі мікроконтролера STMicroelectronics STM32F030F4P6.
3. Програмне забезпечення для проведення аналізу результатів випробувань.
4. Давач лінійного переміщення та контрольно-вимірювальні прилади.

Основними елементами цифрової системи випробувань є:

1. Контрольно-вимірювальні пристрої, котрі проводять збір даних про електричні та механічні параметри вимикача під час спрацювання, до них належать сенсори для вимірювання напруги та струму, часу спрацювання, швидкості руху контактів.
2. Програмне забезпечення для проведення аналізу даних, виявлення відхилення від нормальних параметрів спрацювання.

3. Інтерфейс для взаємодії з оператором виконання випробувань, графічний інтерфейс для відображення в реальному часі стану вимикача та основних параметрів.
4. База даних збереження результатів, дані, отримані під час випробувань, зберігаються у відповідних базах, що дозволяє вести історію кожного вимикача, а також створення звітів та протоколів.

В процесі досліджень проведено аналіз та визначено оптимальні параметри для проведення випробувань високовольтного вимикача (рис. 4).

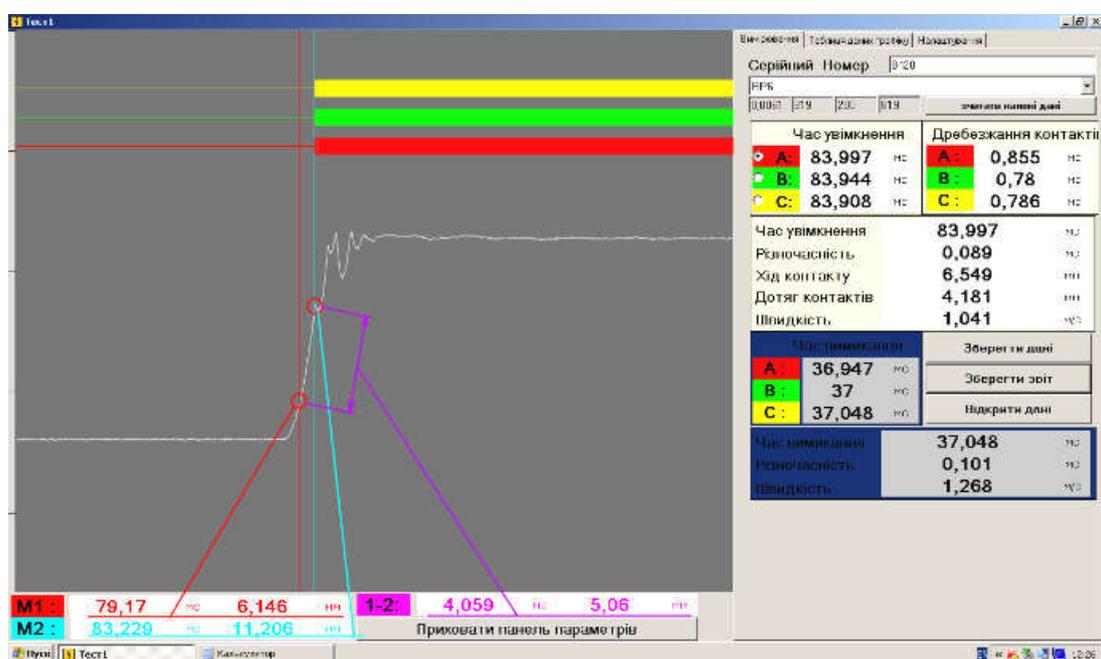


Рис. 4. Графік проведення випробувань

У порядку проведення випробувань визначаються наступні параметри:

1. Час ввімкнення/вимкнення вимикача (а також дані фазного ввімкнення).
2. Різничасність ввімкнення/вимкнення.
3. Хід робочого контакту вакуумного переривника.
4. Дотяг контакту.
5. Швидкість ввімкнення/вимкнення контакту.

Основою апаратної частини інтелектуальної системи є мікроконтролер STMicroelectronics STM32F030F4P6. Для тактування мікроконтролера передбачений кварцовий резонатор частотою 8 МГц та навантажувальні конденсатори ємністю 10 пФ. Живлення схеми забезпечується від зовнішнього блока живлення +12 В через



захисний діодний міст (убезпечує від неправильної полярності напруги живлення) та лінійний стабілізатор AMS1117-3.3 з фільтруючими конденсаторами на вході та виході по 10 мкФ (танталовий) та 100 нФ (керамічний). Схема може працювати в діапазоні напруг живлення 7–15 В. Напруга на виході стабілізатора 3,3 В використовується для живлення компонентів схеми. Для обміну даними плати з комп'ютером використовується інтерфейс RS-232, для чого передбачено конвертер ST3232 з обв'язкою з керамічних конденсаторів ємністю 100 нФ. Для програмування та налагодження програми в мікроконтролері використовується інтерфейс SWD, виведений на п'ятиконтактний роз'єм. Використання такого інтерфейсу дозволило не лише завантажувати прошивку в мікроконтролер, а й налагоджувати програму, переглядати значення змінних під час виконання програми, значення регістрів мікроконтролера, ставити точки зупину тощо.

Для вимірювання положення використовується потенціометричний давач положення, на який подається живлення 3,3 В від стабілізатора та з якого зчитується напруга, пропорційна положенню, аналогово-цифровим перетворювачем мікроконтролера. Команди включення та виключення являють собою змінну напругу 230 В, а тому їхні кола гальванічно ізольовані від решти системи за допомогою транзисторних оптопар SFH615A. Використовується схема зі спільним емітером, а колектори оптопар підтягнуті до напруги живлення через резистори 10 кОм і з'єднані з входами мікроконтролера. Для випрямлення напруги команд включення та виключення використовується діодний міст і включений послідовно навантажувальний резистор опором 110 кОм потужністю 1 Вт. Резистор обмежує силу струму, який проходить далі на оптопару, до безпечної величини. Далі струм з резистора послідовно проходить через світлодіод оптопари, вказаної вище. Протікання струму через світлодіод оптопари призводить до випромінення інфрачервоного випромінювання, яке спричиняє до відкриття транзистора. Сигнал про надходження команди включення або виключення з виходу оптопари є логічно інвертованим: високий логічний рівень напруги, коли немає команди, та низький логічний рівень, якщо надходить команда включення або виключення. Для зміни робочої напруги подачі команд резистор 110 кОм може бути замінений на інший.

Для вимірювання часу спрацювання контактів та інших параметрів передбачено три аналогічні кола для кожної фази. На один контакт фази вимикача з плати подається напруга 3,3 В і, якщо

цей полюс вимикача замкнуто, напруга буде прикладена до резистора та світлодіода транзисторної оптопари SFH615A. Для захисту від виходу напруги, що подається на вхід плати, за межі допустимого включено два захисні швидкодіючі діоди LL4148: струм від джерела сигналу, більшого ніж напруга живлення 3,3 В, через діод буде проходити до позитивного полюса джерела живлення, а струм від джерела сигналу менше, ніж 0 В, через інший діод буде надходити до негативного полюса джерела живлення. Якщо полюс вимикача замкнуто, через світлодіод транзисторної оптопари почне протікати струм, що призведе до відкривання транзистора оптопари, який підключений за схемою зі спільним емітером з підтяжкою до напруги живлення до мікроконтролера. Схема формує інверсні логічні сигнали на мікроконтролер: якщо полюс замкнуто, то на вхід мікроконтролера надходить сигнал низького логічного рівня, а якщо полюс вже або ще розімкнуто, то на вхід мікроконтролера приходять сигнал високого логічного рівня.

В програмному забезпеченні інтелектуальної системи виділені кілька станів, залежно від яких змінюються виконувані операції, що визначаються значеннями змінної `measureStarted`: 0 – система чекає команди включення, 1 – отримана команда включення, триває вимірювання, 2 – вимірювання включення закінчено, пауза, 3 – система очікує команди виключення, 4 – отримана команда виключення, триває вимірювання, 5 – вимірювання виключення завершено, пауза. Фактично це номер стадії вимірювання.

Для вимірювання часу, що пройшов з моменту отримання команди включення або виключення, використовується один з апаратних таймерів загального призначення мікроконтролера – TIM3. Передподільник таймера сконфігурується так, що щоб один відлік таймера відповідав 1 мікросекунді. Враховуючи, що таймер TIM3 шістнадцятирозрядний, максимальний час, що він може зберігати – 65535 мкс. Задля можливості вимірювати більший час введено також змінну-лічильник кількості переповнень таймера. Структура програми, що виконується мікроконтролером – нескінченний цикл з перериваннями. Перед початком нескінченного циклу виконуються початкові присвоєння змінних та ініціалізація HAL – рівня апаратних абстракцій. Останній використовується для спрощення програмування і можливого майбутнього портування програми шляхом абстракції від архітектурних особливостей конкретного мікроконтролера (STM32F030F4P6).



Перед входом в першу ітерацію нескінченного циклу значення `measureStarted` скидається в нуль і система починає очікувати команду на включення вимикача. В цьому режимі обнулюється таймер `TIM3`, а також перевіряється, чи надійшла напруга низького логічного рівня на вхід включення. Якщо виявлено низький логічний рівень напруги (логічний 0), значить команда включення надійшла на вхід плати та оптопару. Тоді обнулюються всі змінні, що використовуються для збереження часу вмикання, змінній `measureStarted` присвоюється 1, що призведе до виконання у нескінченному циклі наступних дій.

Для кожного полюса зчитується логічний рівень на відповідних входах і перевіряється, чи логічний рівень на поточній ітерації циклу відрізняється від логічного рівня на попередній ітерації циклу. Якщо ця умова виконується, робиться висновок про зміну логічного рівня, тобто надходження переднього або заднього фронту імпульсу. Якщо отримано фронт, що відповідає початку команди на включення, то вміст таймера `TIM3`, з врахуванням лічильника переповнень, зберігається в змінну часу першого дотику/контакту `tOnA`, а також встановлюється ознака першого дотику для фази А. Заводи від привода вимикача можуть проявлятися у вигляді додаткових запізнілих імпульсів на полюсах, тому для ігнорування недостовірних імпульсів додатково перевіряється, чи отриманий час більше порогового значення – 17 мс. Для збереження часу останнього брязкоту контактів (англ. *contact bounce*) передбачена змінна `tJtA`, значення якої оновлюється значенням з таймера. Коли стадія 1 закінчиться, в змінній `tJtA` буде час закінчення брязкоту контактів. Аналогічно отримано часові параметри для фаз В і С.

Також під час стадії 1 працює базовий таймер `TIM16`, в обробнику переривання якого запускається аналогово-цифрове перетворення. Частота спрацювання таймера задає частоту опитування. Крім того, в обробнику переривання таймера скидається вміст сторожового таймера `IWDG`. Останній призначений для перезапуску мікроконтролера при його зависанні.

В основному циклі виконується очікування і зчитування результату аналогово-цифрового перетворення, запущеного в перериванні вище. Зчитані дані записуються в масив результатів АЦП для наступної передачі на комп'ютер і виведення користувачеві тоді, коли буде отриманий у масиві останній результат АЦП. Також в цей момент номер стадії змінюється на 2, і починається розрахунок параметрів вимикача й масиву значень графіка положення.

Коли розрахунок закінчено, мікроконтролер надсилає пакет про готовність даних на ПК, останній зчитує їх та візуалізує. Через секунду після надходження команди на включення відбувається перехід на стадію 3 для очікування команди на виключення.

Обмін даними між комп'ютером і платою проходить фреймами, які включають 5 байтів даних, шостий байт контрольної суми та останній байт 0x55 – маркер кінця передачі. Для передачі даних мікроконтролером задіяно контролер прямого доступу до пам'яті, який копіює дані з 7-байтового фрейму, збереженого в пам'яті, в регістр передачі модуля USART1. Прийом даних мікроконтролером здійснено з використанням переривань по прийому байту модулем USART1.

Аналогічно до вищеописаного проходять стадії 3–5 роботи програми при отриманні команди на вимкнення.

**Висновки.** У ході дослідження високовольтних вимикачів відзначено важливу роль, яку вони відіграють в роботі високовольтних підстанцій та мереж і призначених для використання в розподільних пристроях середньої наруги об'єктів інфраструктури та промислових підприємств для включення та відключення під навантаженням електричних кіл у нормальних режимах роботи та для автоматичного відключення при КЗ. Результати дослідження призвели до створення програмного та апаратного забезпечення, яке дозволяє автоматизувати процес випробувань високовольтного обладнання. Важливим є покращення ефективності та точності випробувальних процесів, щоб забезпечити високу достовірність даних та зменшити час, необхідний для випробувань. Проведене дослідження спрямовано на розробку методів та технологій, які дозволять вчасно виявляти потенційні проблеми в високовольтному обладнанні та запобігати аварійним ситуаціям. Важливою є розробка алгоритмів управління, які автоматично регулюють параметри тестувань в реальному часі на основі зібраних даних про стан обладнання та результатів попередніх випробувань. Проведено порівняльний аналіз між стандартними методами випробувань та запропонованим оптимізованим процесом з використанням інтелектуальної системи з метою визначення покращень у часі, точності та надійності вимірювань.

1. ANSI C37.06. High-voltage circuit breakers on a symmetrical currents basis preferred ratings and related required capabilities. 2006. 41 p. 2. Панов А. В., Паньків В. І., Сопель М. Ф., Стогній Б. С., Танкевич Є. М. Актуальні питання



моніторингу і технічного обслуговування високовольтних вимикачів. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 2. С. 75–85. **3.** Костерев М. В., Бардик Є. І. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем. Київ : НТУУ КПІ, 2010. 131 с. **4.** Панов А. В., Паньків В. І., Сопель М. Ф., Танкевич Є. М. Вдосконалення моніторингу технічного стану механічних елементів високовольтних вимикачів. *Праці ІЕД НАНУ*. 2018. Вип. 51. С. 99–109. **5.** 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. *International conference on condition monitoring and diagnosis* (25–28 September 2016, Xi'an, China). Xi'an, China, 2016. P. 139–143. **6.** IEEE 493-2007. IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Gold Book). 2007. 426 p. **7.** IEEE C37.04-1999/Cor 1-2009. IEEE Standard for rating structure for AC high-voltage circuit breakers (Corrigendum to IEEE C37.04-1999). New York, 2009. 36 p. **8.** Rao P., Huang J., Hu X., Xiao J. Testing of breakers using coil current characteristics analysis. *IEEE International conference on control automation* (9–11 December 2009, Christchurch, New Zealand). Christchurch, New Zealand, 2009.

## REFERENCES:

**1.** ANSI C37.06. High-voltage circuit breakers on a symmetrical currents basis preferred ratings and related required capabilities. 2006. 41 p. **2.** Panov A. V., Pankiv V. I., Sopol M. F., Stohnii B. S., Tankevych Ye. M. Aktualni pytannia monitorynhu i tekhnichnoho obsluhovuvannya vysokovoltnykh vymykachiv. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. № 2. С. 75–85. **3.** Kosteriev M. V., Bardyk Ye. I. Pytannia pobudovy nechitkykh modelei otsinky tekhnichnoho stanu obiektiv elektrychnykh system. Kyiv : NTUU KPI, 2010. 131 s. **4.** Panov A. V., Pankiv V. I., Sopol M. F., Tankevych Ye. M. Vdoskonalennia monitorynhu tekhnichnoho stanu mekhanichnykh elementiv vysokovoltnykh vymykachiv. *Pratsi IED NANU*. 2018. Vyp. 51. S. 99–109. **5.** 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. *International conference on condition monitoring and diagnosis* (25–28 September 2016, Xi'an, China). Xi'an, China, 2016. P. 139–143. **6.** IEEE 493-2007. IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Gold Book). 2007. 426 p. **7.** IEEE C37.04-1999/Cor 1-2009. IEEE Standard for rating structure for AC high-voltage circuit breakers (Corrigendum to IEEE C37.04-1999). New York, 2009. 36 p. **8.** Rao P., Huang J., Hu X., Xiao J. Testing of breakers using coil current characteristics analysis. *IEEE International conference on control automation* (9–11 December 2009, Christchurch, New Zealand). Christchurch, New Zealand, 2009.

**Mandziuk R. V., Post-graduate Student, Drevetskyi V. V., Doctor of Engineering, Khrystyuk A. O., Candidate of Engineering (Ph.D.)** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, r.v.mandzyuk@nuwm.edu.ua ; v.v.drevetskyi@nuwm.edu.ua ; a.o.khrystyuk@nuwm.edu.ua)

## **DEVELOPMENT OF A DIGITAL INTELLIGENT SYSTEM FOR TESTING HIGH-VOLTAGE CIRCUIT BREAKERS**

The study presents the development of a digital intelligent testing system for high-voltage circuit breakers, which consists of measurement software and a control board for data collection during testing. The proposed system can automate the testing process of high-voltage equipment. Control algorithms have been developed to automatically adjust testing parameters in real-time based on collected data about the equipment's condition and previous test results. The developed methods and technologies enable timely detection of potential issues in high-voltage equipment and prevent emergency situations. The main objectives of circuit breaker diagnostics include: determining the technical condition of electrical equipment considering variable operational influences; identifying potentially hazardous defects; predicting the remaining service life in real-time. There are numerous parameters for high-voltage circuit breakers; however, diagnostics focus on those regulated by normative and factory documentation. The study highlights the crucial role of high-voltage circuit breakers in the operation of high-voltage substations and networks. These breakers are designed for use in medium-voltage distribution devices of infrastructure facilities and industrial enterprises, ensuring switching on and off under load in normal operation and automatic disconnection in case of short circuits. Research results led to the development of software and hardware solutions that automate the testing process of high-voltage equipment. Consequently, the developed structural scheme will facilitate the creation of an intelligent testing system for high-voltage circuit breakers, enhancing the monitoring of their operational characteristics during manufacturing and use. Improving the efficiency and accuracy of testing processes is crucial to ensuring high data quality and reducing the time required for testing. The research focuses on developing methods and technologies that allow for the timely detection of potential problems in high-voltage equipment and



**the prevention of emergency situations. Additionally, control algorithms have been developed to automatically regulate testing parameters in real-time based on collected data regarding the equipment's condition and previous test results. A comparative analysis between standard testing methods and the proposed optimized process using the intelligent system has been conducted to determine improvements in testing time, accuracy, and reliability.**

***Keywords:* high-voltage circuit breaker; testing; intelligent system; laboratory setup.**