

А. Я. Яцейко

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електроенергетики та систем управління,
andrii.y.yatseiko@lpnu.ua

З. М. Бахор

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електроенергетики та систем управління,
zinovii.m.bakhor@lpnu.ua

СИСТЕМА ОНЛАЙН-МОНІТОРИНГУ ІЗОЛЯЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВВОДІВ 330 кВ

<http://doi.org/10.23939/sepes2022.01.015>

© Яцейко А. Я., Бахор З. М., 2022

Ізоляційні конструкції високовольтного електрообладнання зазнають впливів електромагнітних полів, атмосферних чинників, природних процесів старіння тощо. Наслідком цього є погіршення їх діелектричних характеристик, пошкодження ізоляційної конструкції, що часто призводить до вибуху, пожежі, травмування обслуговуючого персоналу. Тому застосування інформативних, достовірних та безпечних діагностичних систем є важливим експлуатаційним завданням. Основний недолік сучасних систем діагностики ізоляції електрообладнання, особливо онлайн-діагностики, – значний вплив на результати вимірювань електромагнітних завад електроустановки. У статті розглянуто систему онлайн-моніторингу ізоляції високовольтних вводів 330 кВ, принцип дії якої ґрунтується на використанні постійного струму, та запропоновано концепцію побудови такої системи діагностування. Розроблено цифрову модель ізоляції високовольтного вводу 330 кВ, яка відтворює процеси в його паперово-оливній ізоляційній конструкції за впливу основних експлуатаційних факторів. За результатами дослідження погіршення характеристик ізоляції вводу, впливу зміни температури і зволоженості, часткових перекриттів у зоні встановлення додаткових вирівнювальних пластин вводу вибрано основний діагностичний параметр стану ізоляції вводу – спад постійної напруги на еталонному резисторі та встановлено його кількісні характеристики. Моніторинг напруги на еталонному резисторі дасть змогу своєчасно та достовірно оцінювати погіршення характеристик ізоляції вводу та запобігати розвитку аварій, а використання постійного струму усуває вплив паразитних струмів і завад електроустановки на результати вимірювань. Запропоновано структурну схему системи онлайн-моніторингу ізоляції високовольтних вводів 330 кВ.

Ключові слова: онлайн-моніторинг; діагностика; високовольтний ввід; цифрова модель; ізоляційна конструкція.

Постановка проблеми

Одне із важливих завдань електроенергетики України – необхідність перегляду системи технічного діагностування та ремонту високовольтного електроустаткування, зокрема, високовольтних вводів. Для цього необхідне поєднання компонентів систем якісного технічного

діагностування та ремонтів [1–4]. На сучасному етапі під час реалізації діагностування високовольтних вводів застосовують два основні методи: онлайн-діагностику та періодичний контроль, який ґрунтується на випробуваннях під час вимкнення електричного апарата. Неперервний моніторинг потребує застосування складних та дорогавартісних систем діагностики, які б давали змогу достовірно оцінювати стан ізоляції високовольтних вводів.

Актуальні завдання сьогодні такі: розроблення нових методів та технологій контролю ізоляції високовольтних вводів з метою виявлення потенційно ненадійного устаткування, можливості продовження безаварійної роботи застарілого обладнання.

Мета та завдання дослідження

За допомогою цифрового моделювання дослідити можливості онлайн-діагностики ізоляції високовольтних вводів 330 кВ із застосуванням постійного струму та розробити концепцію побудови такої системи діагностування. Для цього необхідно: сформувати адекватну цифрову модель ізоляції високовольтного вводу 330 кВ із паперово-оливною ізоляцією, котра б давала змогу відтворювати процеси в паперово-оливній ізоляційній конструкції за впливу експлуатаційних факторів; виконати дослідження, за результатами яких оцінити можливість онлайн-діагностування стану ізоляції вводів на постійному струмі та визначити діагностичні показники та їх кількісні оцінки; розробити структурну схему системи онлайн-моніторингу ізоляції оливнонаповнених високовольтних вводів, яка дасть можливість реалізувати запропоновані підходи.

Аналіз останніх досліджень

У науковій та технічній літературі значну увагу звертають на питання діагностики та випробувань ізоляції високовольтного електроустаткування, зокрема, й високовольтних вводів [1–11]. Основною проблематикою одержання достовірного та своєчасного результату діагностування є застосування періодичного контролю, із урахуванням значного впливу експлуатаційних факторів (електромагнітні впливи та завади, температура, вологість) та особливостей динаміки розвитку прихованих та локальних дефектів [1, 4–11].

Зокрема, в [1] проаналізовано вплив особливостей експлуатації високовольтних вводів на стан їх ізоляції за результатами профілактичних вимірювань тангенса кута діелектричних втрат та відзначено складність оцінювання стану ізоляції за цим діагностичним параметром. Також автори у роботі [1] зазначають, що для високовольтних вводів характерні не лише числові значення діагностичних параметрів, а й динаміка зміни цих параметрів у часі.

У роботах [6–8] розглянуто особливості моделювання часткових розрядів у ізоляції та можливості оцінювання стану ізоляції за рівнем часткових розрядів. Автори стверджують про необхідність застосування високочастотних методів вимірювання цих показників, для того щоб підвищити достовірність результатів стосовно стану ізоляції.

У [9–11] наведено огляд методів та систем діагностування високовольтного електроустаткування, зокрема силових трансформаторів та їх високовольтних вводів, а також подано їх характеристику. Автори відзначають істотні складнощі в одержанні своєчасного та достовірного результату діагностики електроустаткування в умовах експлуатації.

Автори статті запропонували систему онлайн-моніторингу ізоляції оливнонаповнених високовольтних вводів, у якій за рахунок контролю спаду напруги на взірцевому резисторі, зумовленого постійним струмом, підвищується достовірність діагностики високовольтних вводів в умовах експлуатації, оскільки усувається вплив на результати вимірювання похибок, спричинених складовими струмів впливів і завод.

Виклад основного матеріалу

Досліджено оливнонаповнений високовольтний ввід 330 кВ, основна внутрішня ізоляція у якому – просочений трансформаторною оливою паперовий кістяк (остов). Для вирівнювання електричного поля вздовж його конструкції використовують вирівнювальні обкладки з металеві фольги (рис. 1). Краї основних обкладок є слабким місцем ізоляції, оскільки в цих місцях напруженість електричного поля більша, ніж посередині, що призводить до швидшого розвитку іонізаційних процесів та ковзних розрядів. Зниження напруженості електричного поля на краях основних вирівнювальних обкладок досягається за рахунок додаткових вирівнювальних пластин, які розташовують між краями основних обкладок. Основні обкладки (24 шт.) розміщені по всій довжині паперового кістяка ізоляції вводу, а додаткові (44 шт.) – між основними обкладками, по їх краях. Остання вирівнювальна обкладка спеціальним провідником приєднується до заземлених металевих деталей високовольтного вводу. Для діагностики стану ізоляції вводу від передостанньої обкладки кістяка зроблено спеціальний вимірювальний вивід, до якого під'єднують системи вимірювань та моніторингу.

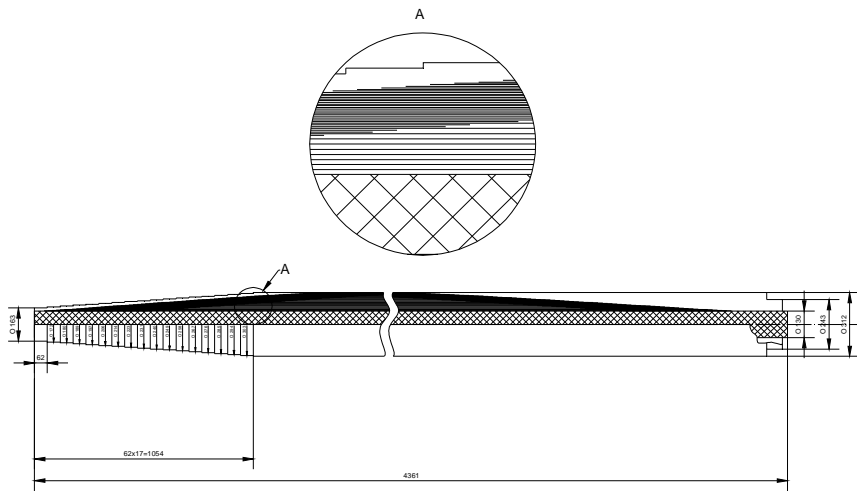


Рис. 1. Конструкція внутрішньої ізоляції високовольтного вводу 330 кВ

Цифрову модель високовольтної ізоляції вводу 330 кВ сформовано на основі її геометричних розмірів із урахуванням особливостей моделювання конденсаторної ізоляції. Розрахунок параметрів цифрової моделі (рис. 2) виконували, беручи до уваги рекомендації [12]:

$$C_i = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{ob}L_i}{\ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)}, \quad G_i = \frac{2\pi\gamma_{ob}L_i}{\ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)}, \quad R_i = \frac{1}{G_i},$$

де ϵ_{ob} – діелектрична проникність паперово-оливної ізоляції; ϵ_0 – діелектрична проникність вакууму; L_i – довжина i -ї основної обкладки; r_i, r_{i+1} – радіуси i -ї та наступної обкладки; i – кількість основних обкладок; γ_{ob} – питома провідність паперово-оливної ізоляції.

У моделі враховано трансформаторну оливу, якою заповнений ввід. Параметри трансформаторної оливи обчислено для відстані від кістяка до заземленого виводу за виразами:

$$R_{oi} = \frac{r_o h_{pi}}{\rho \times r_{i+1}^2 - \rho \times r_i^2}, \quad C_{oi} = \frac{\epsilon_o \epsilon_{ol} (\rho \times r_{i+1}^2 - \rho \times r_i^2)}{h_{pi}},$$

де ρ_o – питомий опір оливи; h_{pi} – довжина i -го рівня паперово-оливної ізоляції; r_i, r_{i+1} – радіуси i -го та наступного рівня паперово-оливної ізоляції.

На цифровій моделі (рис. 2) також змодельовано систему онлайн-моніторингу ізоляції високовольтного вводу, принцип дії якої ґрунтується на застосуванні постійної напруги [13]: $C_{c4} = 4$ мкФ – ємність шунтуючого конденсатора, який приєднується до вимірювального виводу високовольтного

вводу; $R_{ВВ}$ – опір ізоляції вимірювального виводу високовольтного вводу; $R_{ic4} = 15000 \text{ МОм}$, $R_{ic5} = 15000 \text{ МОм}$ – опори ізоляції конденсаторів, представлених ємностями C_{c4} , C_{c5} відповідно; $R_{c1}-C_{c5} = 1 \text{ мкФ}$ – моделюють фільтр, призначений для мінімізації змінної напруги; $R_{c2} = 1 \text{ МОм}$ – еталонний резистор у схемі пристрою вимірювання; R_{c3} , C_{c3} – моделюють фільтр змінної напруги, яка може з’явитись на еталонному резисторі R_{c2} . Отже, в розрахунковій моделі враховано всі основні елементи схеми вимірювання постійного струму спливу в ізоляції.

Розглянемо, як функціонує система онлайн-моніторингу ізоляції високовольтних ввідів 330 кВ за допомогою неперервного вимірювання постійного струму спливу в ізоляції. Постійна напруга від джерела уніполярної напруги $U_d = +140 \text{ В}$ (відносно “землі”) через еталонний резистор R_{c2} підводиться до вимірювального виводу “В” високовольтного вводу. Між виводом “В” та землею “З” увімкнено конденсатор C_{c4} , призначений для обмеження змінної напруги між виводом “В” та землею. Додаткове паралельне під’єднання R–C ланки $R_{c1} = 3 \text{ МОм}$ і $C_{c5} = 1 \text{ мкФ}$ паралельно до конденсатора C_{c4} практично не впливає на значення напруги на вимірювальному виводі, оскільки $R_{c1} = 3 \text{ МОм} \gg X_{C4} = 795,8 \text{ Ом}$. Ланка $R_{c1}-C_{c5}$ необхідна для того, щоб звести до мінімуму змінну складову напруги промислової частоти мережі $U_{C5(50)}$, яка підводиться через резистор R_{c2} до джерела постійної напруги від виводу “В”. Ця напруга визначається за виразом:

$$U_{C_{c5}} = \frac{1}{1 + j2\pi f R_{c1} C_{c5}} \times U_{C_{c4}}.$$

Через резистор R_{c2} практично протікатиме постійний струм без пульсацій, оскільки конденсатор C_{c5} заряджається від джерела постійної напруги через резистор R_{c2} , а розряджається – через R_{c1} .

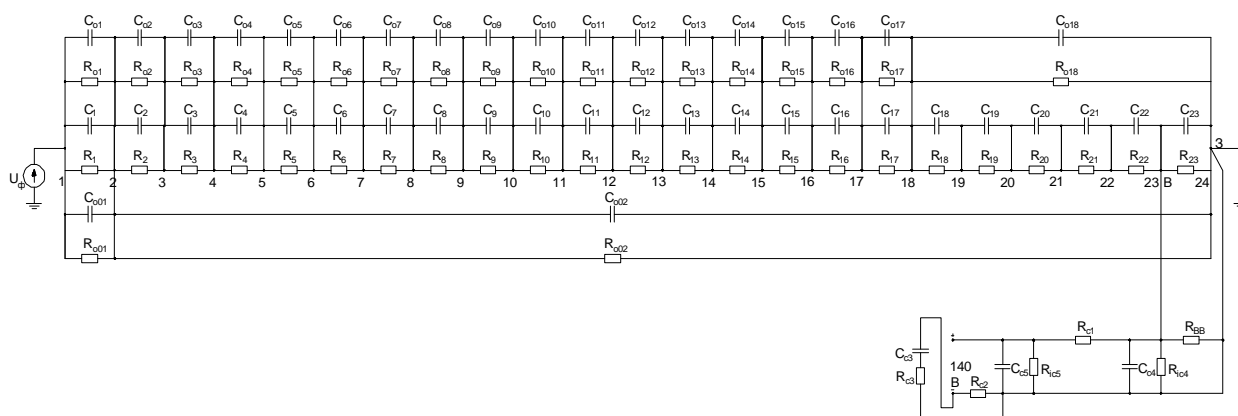


Рис. 2. Цифрова модель високовольтної ізоляції вводу 330 кВ із системою онлайн-моніторингу ізоляції на основі застосування постійної напруги

Така схемна реалізація дасть змогу ефективно контролювати сумарний струм спливу в ізоляції високовольтного вводу, за умови стабільності опорів ізоляції R_{ic4} і R_{ic5} конденсаторів C_{c4} і C_{c5} . Контрольований спад напруги U_{contr} на еталонному резисторі R_{c2} від сумарного струму спливу I_i в ізоляції становитиме $U_{contr} = I_i \times R_{c2}$.

Дослідження запропонованої системи онлайн-моніторингу ізоляції високовольтних ввідів 330 кВ виконано за допомогою цифрової моделі (рис. 2) у комплексі REC [14].

На першому етапі досліджено зміни контрольованої напруги U_{contr} від зменшення опору ізоляції R_{iz} , з кроками розрахунку: 0,5 мс, 1 мс, 3 мс, 5 мс. Як показав аналіз результатів, наведених на рис. 3, а, із порівнянням їх з результатами розрахунку лише на постійній напрузі, необхідна точність моделювання досягається за кроку розрахунку 1 мс.

Встановлено, що зміна контрольованої величини системи онлайн-моніторингу ізоляції високовольтного вводу – спаду напруги на взірцевому опорі із 74,17 мВ до 193,9 мВ відповідає зміні діагностичного параметра опору внутрішньої ізоляції досліджуваного вводу 330 кВ від 100 % до 10 %.

На характеристики внутрішньої ізоляції вводу істотно впливають такі експлуатаційні фактори, як температура і зволоженість. Тому досліджено їх вплив на значення контрольованого параметра U_{contr} системи моніторингу ізоляції вводу. Результати щодо залежності напруги U_{contr} від температури, зволоженості, від сумісного їх впливу на ізоляцію вводу, відповідно, подано на рис. 3, б–г.

Аналізуючи результати виконаних досліджень, бачимо, що: зменшення опору основної ізоляції вводу зі зміною температури від 0 до +70 °С (рис. 3, б) спричиняє зміну контрольованої величини з 64,95 мВ до 111,7 мВ; збільшення вмісту води в ізоляції понад 1 % призводить до недопустимого зменшення опору ізоляції вводу ($R_{із} < 500$ МОм). Відповідно до [3], значення опору ізоляції високовольтного вводу 330 кВ під час введення в експлуатацію має бути не меншим за 1000 МОм, а під час експлуатації – не меншим за 500 МОм, що відповідає значенню $U_{contr} = 280$ мВ (рис. 3, б); одночасне врахування впливу зволоженості та температури показує, що за зволоженості ізоляції 1 % і температури від 0 до 15 °С експлуатація високовольтного вводу ще допускається, оскільки $U_{contr} < 280$ мВ, а у разі подальшого зростання зволоженості необхідно негайно вимкнути контрольований високовольтний ввід.

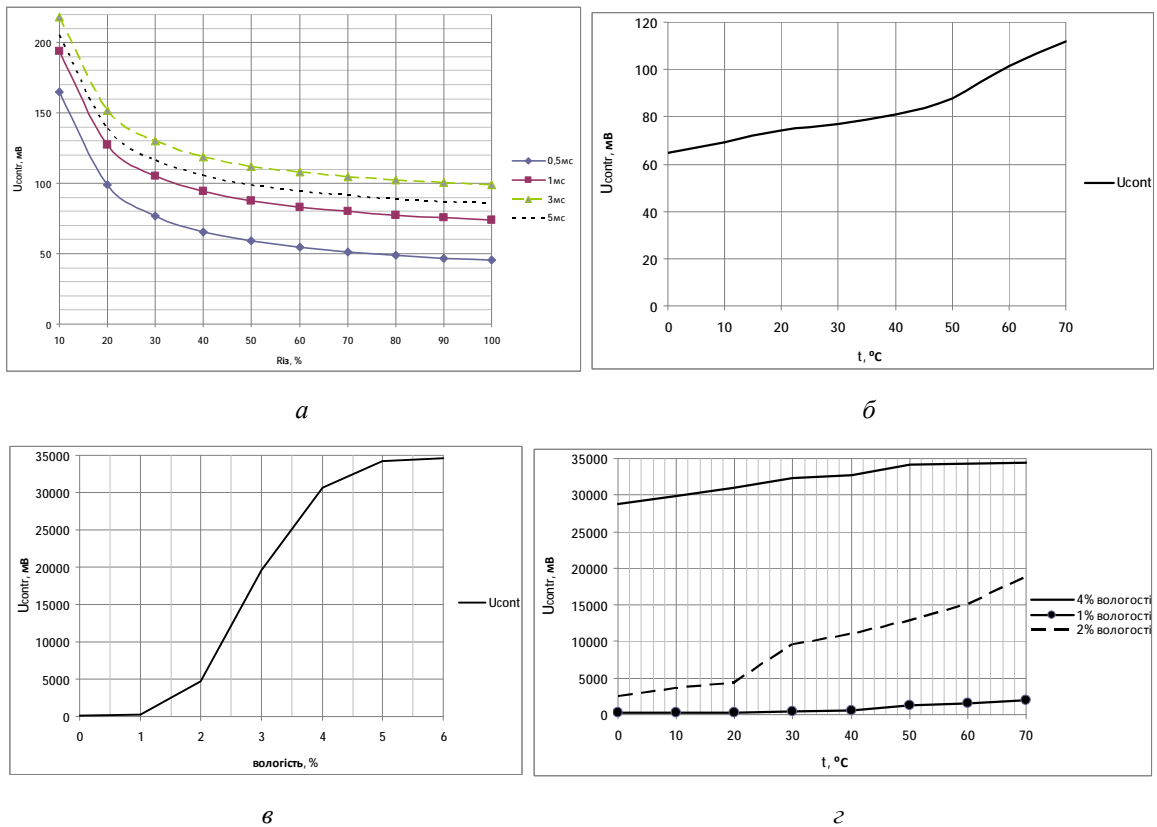


Рис. 3. Зміна U_{contr} залежно від: а – погіршення опору ізоляції $R_{із}$, % високовольтного вводу 330 кВ; б – зміни температури t ; в – зміни зволоженості ізоляції; г – одночасного врахування зміни зволоженості та температури ізоляції

Також досліджено вплив часткових перекриттів внутрішньої ізоляції високовольтного вводу 330 кВ у зоні встановлення додаткових вирівнювальних обкладок на значення контрольованої величини U_{contr} . Результати досліджень (див. таблицю) показують, що система онлайн-моніторингу ізоляції високовольтних вводів 330 кВ малочутлива до пошкоджень ізоляції вирівнювальних обкладок, розташованих у внутрішніх шарах кістяка, але буде чутливою до пошкоджень останніх шарів ізоляції, тобто вимірювального конденсатора (23–24 обкладки).

Результати досліджень під час часткових перекриттів ізоляції додаткових вирівнювальних обкладок

R_{iz} між обкладками, %	Контрольована величина U_{contr} , мВ за перекриття між обкладками		
	1–2, 2–3, 3–4	10–11, 11–12, 12–13	23–24
100	70,76	70,76	70,76
75	70,78	70,77	75,14
50	70,78	70,76	83,65
25	70,79	70,78	109,6
0	77,22	77,4	35000

Результати цифрового моделювання процесів у паперово-оливній ізоляції вводу вказують на можливість ефективного застосування запропонованої системи онлайн-моніторингу ізоляції високовольтних вводів 330 кВ на основі використання постійної напруги. Тому розроблено структурну схему цієї системи (рис. 4).

Система онлайн-моніторингу функціонує так. На вимірний “В” і заземлений “З” виводи високовольтного вводу надходить випрямлена та згладжена напруга від джерела VS1, а струм розподіляється між опорами внутрішньої ізоляції високовольтного вводу. В разі погіршення стану ізоляції її еквівалентний опір зменшуватиметься, а постійний струм у вимірювальному колі зростатиме, збільшуватиметься і спад напруги на еталонному резисторі R_2 , що й зафіксує пристрій опрацювання і аналізу результатів.

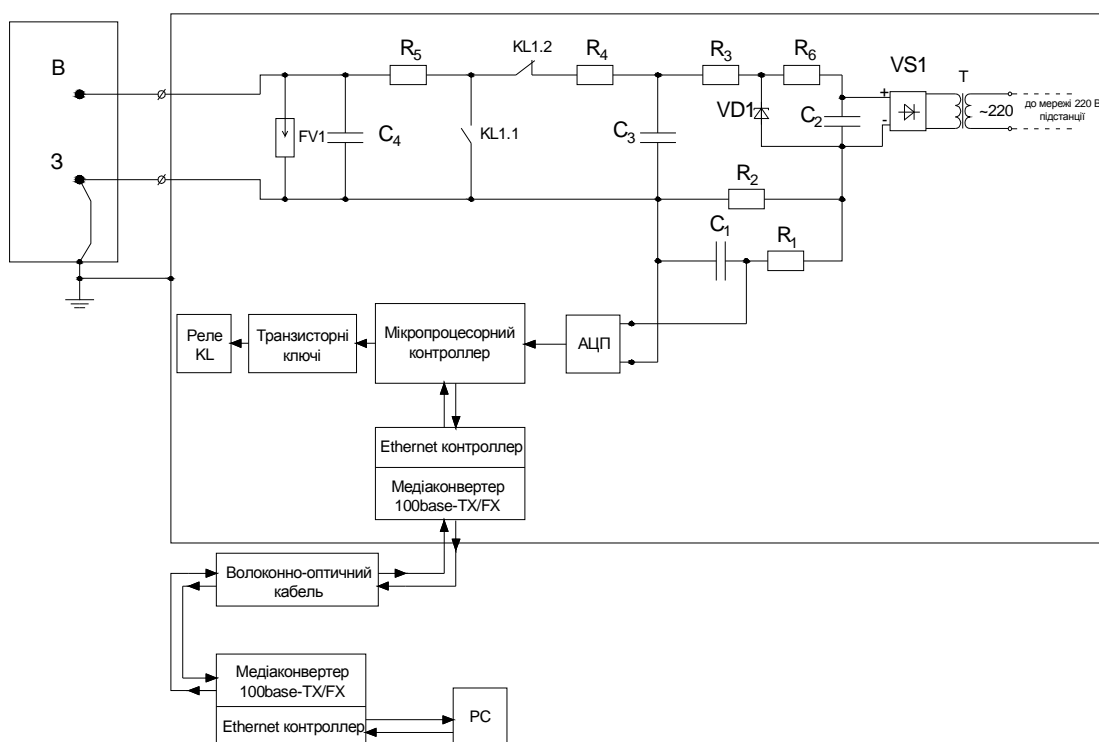


Рис. 4. Структурна схема системи онлайн-моніторингу ізоляції високовольтних вводів 330 кВ

Система вимірювання розташована в екранованому, заземленому корпусі й живиться від мережі змінної синусоїдної напруги 220 В підстанції через понижувальний роздільний трансформатор Т. Випрямляч VS1 випрямляє змінну напругу вторинної обмотки трансформатора Т, а конденсатор C_1 та стабілітрон VD1 стабілізують коливання випрямленої напруги. Резистор R_6 компенсує різницю між випрямленою напругою випрямляча VS1 та напругою стабілізації стабілітрона VD1. Резистор R_2 – це еталонний резистор, спад напруги на якому контролюється та є

діагностичним параметром. Фільтр R_1-C_1 призначений для мінімізації змінної напруги на еталонному резисторі R_2 . Ланка R_4-C_3 необхідна для того, щоб звести до мінімуму змінну складову напруги промислової частоти мережі, яка підводиться через резистор R_2 до джерела постійної напруги від виводу “В” високовольтного вводу. Розрядні резистори R_4 і R_5 призначені для обмеження поштовху розрядних струмів у момент закорочення ємностей C_3 та C_4 . Конденсатор C_4 забезпечує зниження змінної напруги між виводом “В” та землею (вивід “З”) до значень, менших за 100 В. Вхід системи моніторингу захищено розрядником або обмежувачем перенапруг FV1.

Контакти KL1.1 та KL1.2 реле KL використано з метою заземлення вимірювального виводу в разі від'єднання системи від виводу “В”, а також під час її калібрування.

Контрольована величина (спад напруги на резисторі R_2) подається на аналого-цифровий перетворювач (АЦП), дискретний сигнал з АЦП передається до мікроконтролера, який через мережу Ethernet, утворену Ethernet контролером та медіаконвертором, волоконно-оптичним кабелем передає результати вимірювання до системи аналізу та оброблення результатів (персонального комп'ютера PC). Результати моніторингу обробляються та аналізуються за допомогою спеціального програмного забезпечення та формується протокол випробувань. Така мережа дає змогу дистанційно керувати системою моніторингу, здійснювати її калібрування та формувати результати діагнозу.

Запропонована система моніторингу ізоляції високовольтних вводів має конструктивні та схемні переваги. Пересилання даних волоконно-оптичним кабелем усуває вплив електромагнітних завад електроустановки, яка працює. Її перевагою також є відсутність електричного зв'язку між блоком вимірювань та блоком оброблення результатів, що підвищує рівень безпеки під час експлуатації запропонованої системи моніторингу ізоляції вводів.

Висновки

1. Дослідження системи онлайн-моніторингу ізоляції високовольтних вводів 330 кВ із застосуванням постійного струму, які виконано за допомогою цифрового моделювання ізоляційної конструкції вводу та системи діагностики, свідчать про її працездатність та можливість практичної реалізації на об'єктах електроенергетики.

2. Моделювання процесів у ізоляційній конструкції високовольтного вводу 330 кВ із урахуванням погіршення характеристик ізоляції, впливу температури, зволоженості, часткових перекриттів у зоні встановлення додаткових вирівнювальних пластин показує, що зміни діагностичного параметра (контрольованого спаду постійної напруги) відбуваються у достатньо широкому діапазоні (74,17–280 мВ і вище). Це дасть змогу своєчасно та достовірно оцінювати погіршення характеристик ізоляції та запобігати розвитку аварій, а використання постійної напруги дає можливість усунути із результатів вимірювань паразитні струми спливів та завад, які за вимірювань на змінній напрузі співмірні із діагностичними параметрами.

3. Розроблена структурна схема запропонованої системи онлайн-моніторингу ізоляції високовольтних вводів 330 кВ дає змогу реалізовувати діагностування електричних апаратів із мінімізацією впливів електромагнітних перешкод, дистанційно керувати системою моніторингу, здійснювати її калібрування та формувати результати діагностування.

Перспективи подальших досліджень

Передбачається виконання досліджень щодо аналізу поляризаційних процесів і часткових розрядів у ізоляційних конструкціях високовольтних вводів та чутливості до них запропонованої системи онлайн-моніторингу. Перспективними також є виконання аналогічних досліджень для високовольтних вводів інших класів напруг та розроблення концепції побудови універсальної автоматизованої системи діагностики цього електроустаткування в експлуатаційних умовах.

Список літератури

1. Шутенко О. В., Загайнова А. А. Діагностика состояния высоковольтных маслонаполненных вводов на основе анализа динамики изменения показателей изоляции во времени. Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Сер.: Техніка та електрофізика високих напруг: зб. наук. пр. Харків: НТУ “ХПІ”. 2019. № 18 (1343). С. 62–76. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/42736>

2. Рубаненко О. С., Гуменюк О. І. Високовольтні вводи. Конструкція, експлуатація, діагностика і ремонт. Вінниця: ВНТУ, 2011. 183 с.
3. Норми випробування електрообладнання: СОУ-Н ЕЕ 20.302:2020. Офіц. вид. Київ: ПАТ НЕК “Укренерго”: Міністерство енергетики та захисту довкілля України. 238 с.
4. Шутенко О. В., Загайнова А. А., Сердюкова Г. Н. Анализ влияния условий и режимов эксплуатации на техническое состояние основной изоляции высоковольтных вводов различной конструкции. *Електротехніка і електромеханіка*. Харків: НТУ “ХПІ”. 2019. № 1. С. 33–42. DOI: 10.20998/2074-272X.2019.1.08.
5. Shutenko O. Method for Detection of Developing Defects in High-Voltage Power Transformers by Results of the Analysis of Dissolved Oil Gases. *Acta Electrotechnica et Informatica*, 2018, Vol. 18, No. 1, pp. 11–8. DOI: 10.15546/aeii-2018-0002.
6. Bo Qi, Quanmin Dai, Chengrong Li, Zipeng Zeng, Mingli Fu, Ran Zhuo. The Mechanism and Diagnosis of Insulation Deterioration Caused by Moisture Ingress into OilImpregnated Paper Bushing. *Energies*, 2018, T. 11, No. 6, pp. 1496. DOI: 10.3390/en11061496.
7. Trotsenko Ye., Brzhezitsky V., Protsenko O., Chumack V., Haran Ya. Simulation of partial discharges under influence of impulse voltage // *Technology audit and production reserves*. 2018, Vol. 1, No. 1 (39), pp. 36–1. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.123309.
8. Wu M., Cao H., Cao J., Nguyen H., Gomes J. B. and Krishnaswamy S. P., “An overview of state-of-the-art partial discharge analysis techniques for condition monitoring”, in *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 31, no. 6, pp. 22–35, November-December 2015. DOI: 10.1109/MEI.2015.7303259.
9. Metwally I. A. Failures, monitoring and new trends of power transformers. *IEEE Potentials*, 2011, Vol. 30, iss. 03, pp. 36–43. URL: https://www.researchgate.net/publication/224236270_Failures_Monitoring_and_New_Trends_of_Power_Transformers.
10. Nedelcut D., Sacerdotianu D., Tanasescu G., Nicolae S., Voinescu L. On-line and off-line monitoring-diagnosis system (MDS) for power transformers. *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. Beijing, 2008, pp. 949–955. DOI: 10.1109/CMD.2008.4580440.
11. Li S., Li J. Condition monitoring and diagnosis of power equipment: review and prospective. *High Voltage*, 2017, Vol. 2, no. 2, pp. 82–91. DOI: 10.1049/hve.2017.0026.
12. Техніка і електрофізика високих напруг: навч. посіб. / за ред. В. О. Бржезицького та В. М. Михайлова. Харків: НТУ “ХПІ” Торнадо, 2005. 930 с.
13. Яцейко А. Я. Система діагностики під робочою напругою ізоляції високовольтних трансформаторів струму 330 кВ. *Електроінформ*. 2007. № 1. С. 12–15.
14. Равлик О. М., Равлик Н. О. Програмний комплекс “REC” для аналізу процесів в електричних мережах, системах їх захисту й автоматики. *Свідоцтво про реєстр. авт. права на твір*. № 62351. 2015.

References

1. Shutenko O. V., Zahaynova A. A. Dyahnostyka sostoyanyya vysokovol'tnykh maslonapolnennykh vvodov na osnove analy za dynamyky yzmenenyya pokazateley yzolyatsyy vo vremeny. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho univertsytetu “KHPI”*. Ser.: *Tekhnika ta elektrofizyka vysokokh napruh: zb. nauk. pr.* Kharkiv: NTU “KHPI”. 2019. No. 18 (1343). С. 62–76. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/42736>.
2. Rubanenko O. Ye., Humenyuk O. I. Vysokovol'tni vvody. *Konstruktsiya, ekspluatatsiya, diahnostyka i remont*. Vinnytsya: VNTU, 2011. 183 s.
3. Normy vyprobuvannya elektroobladnannya: SOU-N EE 20.302:2020. Ofits. vyd. Kyiv: PAT NEK “Ukrenerho”: Ministerstvo enerhetyky ta zakhystu dovkillya Ukrainy. 238 s.
4. Shutenko O. V., Zagaynova A. A., Serdyukova G. N. Analiz vliyaniya usloviy i rezhimov ekspluatatsii na tekhnicheskoye sostoyaniye osnovnoy izolyatsii vysokovol'tnykh vvodov razlichnoy konstruktssii. *Elektrotekhnika i elektromekhanika*. Kharkiv: NTU “KHPI”, 2019, No. 1, С. 33–42. DOI: 10.20998/2074-272X.2019.1.08.
5. Shutenko O. Method for Detection of Developing Defects in High-Voltage Power Transformers by Results of the Analysis of Dissolved Oil Gases. *Acta Electrotechnica et Informatica*, 2018, Vol. 18, No. 1, С. 11–8. DOI: 10.15546/aeii-2018-0002.
6. Bo Qi, Quanmin Dai, Chengrong Li, Zipeng Zeng, Mingli Fu, Ran Zhuo The Mechanism and Diagnosis of Insulation Deterioration Caused by Moisture Ingress into OilImpregnated Paper Bushing. *Energies*, 2018, T. 11, No. 6, pp. 1496. DOI: 10.3390/en11061496.
7. Trotsenko Ye., Brzhezitsky V., Protsenko O., Chumack V., Haran Ya. Simulation of partial discharges under influence of impulse voltage // *Technology audit and production reserves*, 2018, Vol. 1, No. 1 (39), pp. 36–1. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.123309.

8. Wu M., Cao H., Cao J., Nguyen H., Gomes J. B. and Krishnaswamy S. P., “An overview of state-of-the-art partial discharge analysis techniques for condition monitoring”, in *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 31, no. 6, pp. 22–35, November-December 2015. DOI: 10.1109/MEI.2015.7303259.

9. Metwally I. A. *Failures, monitoring and new trends of power transformers. IEEE Potentials*, 2011, Vol. 30, iss. 03, pp. 36–43. URL: https://www.researchgate.net/publication/224236270_Failures_Monitoring_and_New_Trends_of_Power_Transformers

10. Nedelcut D., Sacerdotianu D., Tanasescu G., Nicolae S., Voinescu L. *On-line and off-line monitoring-diagnosis system (MDS) for power transformers. 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Beijing, 2008*, pp. 949–955. DOI: 10.1109/CMD.2008.4580440.

11. Li S., Li J. *Condition monitoring and diagnosis of power equipment: review and prospective. High Voltage*, 2017, Vol. 2, No. 2, pp. 82–91. DOI: 10.1049/hve.2017.0026.

12. *Tekhnika i elektrofizyka vysokikh napruh: navch. posib. / za red. V. O. Brzhezys'koho ta V. M. Mykhaylova. Kharkiv: NTU “KHPI” Tornado, 2005. 930 s.*

13. Yatsyko A. Ya. *Systema diahnostyky pid robochoyu napruhoju izolyatsiyi vysokovol'tnykh transformatoriv strumu 330 kV. Elektroinform, 2007, No. 1, S. 12–15.*

14. Ravlyk O. M., Ravlyk N. O. *Prohramnyy kompleks “REC” dlya analizu protsesiv v elektrychnykh mrezhakh, systemakh yikh zakhystu y avtomatyky. Svidotstvo pro reyestr. avt. prava na tvir, No. 62351. 2015*

A. Yatseiko,

Lviv Polytechnic National University,
Department of Electric Power Engineering and Control Systems,
andrii.yatseiko@lpnu.ua

Z. Bakhor,

Lviv Polytechnic National University,
Department of Electric Power Engineering and Control Systems,
zinovii.m.bakhor@lpnu.ua

ONLINE INSULATION MONITORING SYSTEM FOR HIGH VOLTAGE BUSHINGS 330 kV

© Yatseiko A., Bakhor Z., 2022

Insulating structures of high-voltage electrical equipment are exposed to electromagnetic fields, atmospheric factors, natural aging processes and more. The consequence of this is the deterioration of their dielectric properties, damage to the insulating structure, which often leads to explosions, fires, injuries to staff. Therefore, the use of informative, reliable and safe diagnostic systems is an important operational task. The main disadvantages of existing electrical insulation diagnostics systems, especially online diagnostics, are the significant impact on the results of measurements of electromagnetic interference of electrical installations. The article considers the system of online monitoring of insulation of high-voltage bushings 330 kV, the principle of which is based on direct current and offers the concept of building such a diagnostic system. A digital model of 330 kV high-voltage bushing insulation has been developed, which reproduces the processes in its paper-oil insulation construction under the influence of the main operational factors.

Deterioration of high-voltage bushing insulation, influence of temperature and humidity change, partial overlaps between additional leveling plates are investigated. The basic diagnostic parameter of control of a condition of isolation of high-voltage bushing is chosen. This is a DC voltage across the reference resistor. Monitoring the voltage on the reference resistor will allow timely and reliable assessment of deterioration of the insulation characteristics of the bushing and prevent the development of accidents. The use of direct current eliminates the influence of parasitic currents and interference of the existing electrical installation on the measurement results. The structural scheme of the system of online monitoring of insulation of high-voltage bushings of 330 kV is offered.

Key words: online monitoring; diagnostics; high-voltage bushing; digital model; insulating construction.