

РЕЗОНАНСНА СИСТЕМА ВИПРОБОВУВАННЯ НАДВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛІВ ЗІ ЗШИТОЮ ПОЛІЕТИЛЕНОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

Щерба А.А., член-кор. НАНУ, Грудська В.П., доц.

НТУУ «КПІ», кафедра теоретичної електротехніки

Гречкосій К.Р., студент

НТУУ «КПІ», кафедра електропостачання

Олійник В.С., студент

НТУУ «КПІ», кафедра атомних електростанцій та інженерної теплофізики

Вступ. Сучасний розвиток енергетичних систем країн Європи, Америки та Азії базується на використанні силових кабелів зі зшитою поліетиленовою (ЗПЕ) ізоляцією, яка порівняно з традиційною має підвищену термостійкість і менші діелектричні втрати. Це забезпечує підвищення пропускної спроможності, надійності та ресурсу кабельних ліній електропередачі (ЛЕП). Відсутність в ЗПЕ ізоляції шкідливих рідких компонентів та її висока гнучкість сприяють будівництву екологічно безпечних кабельних ЛЕП з довільними перепадами та різкими вигинами трас. Україна першою серед країн СНД освоїла промисловий випуск кабелів зі ЗПЕ ізоляцією на високі та надвисокі напруги (до 330 кВ), що забезпечує можливість побудови вітчизняних кабельних ЛЕП потужністю в сотні – тисячі мегавольтампер [1].

Експлуатація таких надпотужних ЛЕП базується на високій надійності кабелів, що використовуються, тому при їх виготовленні особлива увага приділяється створенню спеціальних надвисоковольтних систем для їх діагностики на надійність. Діагностика високовольтних і надвисоковольтних кабелів з твердою ЗПЕ ізоляцією має особливість, пов'язану з недопустимістю використання тривалих постійних і синусоїдних напруг промислової частоти, в 2–3 рази вищих, ніж експлуатаційні. Тривале використання недопустимо підвищеної напруги призводить до накопичення в нанодіфектах ЗПЕ ізоляції об'ємних зарядів, її незворотної деградації та зменшення надійності й ресурсу.

Найбільш прогресивний метод діагностики ЗПЕ ізоляції надвисоковольтних кабелів на 330 кВ базується на вимірюванні рівня часткових розрядів (ЧР), які виникають в її газових нано- та мікропорожнинах під впливом короткочасних синусоїдних напруг до 500 кВ промислової частоти 50 Гц. Європейськими лідерами з розробки та створення комплексів для діагностики надвисоковольтних кабелів зі ЗПЕ ізоляцією є нідерландська фірма "DNV KEMA Energy&Sustainability" та німецькі фірми "Seba КМТ" і "High Volt".

Концепція комплексу для діагностики надвисоковольтних кабелів зі ЗПЕ ізоляцією. Концепція базується на використанні явища резонансу синусоїдних напруг у контурі, утвореному послідовним з'єднанням досліджуваного кабелю і дроселя з регульованою індуктивністю. Вибір цієї концепції ґрунтується на наступних перевагах послідовного резонансного контуру порівняно з підвищувальним трансформатором та паралельним резонансним контуром.

Мала вхідна потужність. Послідовний резонансний контур характеризується добротністю $Q = U_L/U = U_C/U = (\sqrt{L/C})/R$, де U – напруга на вході.

Якщо випробування силового кабелю має проходити, наприклад, за умов напруги $U_C = 500$ кВ, струму $I = 2$ А і добротності $Q = 50$, то на вході контуру слід забезпечити напругу $U = U_C/Q = 10$ кВ при потужності джерела $S = UI = 20$ кВА. За допомогою відповідного підвищувального трансформатора таку систему можна підключити до низьковольтної мережі.

Малий струм короткого замикання. При резонансі повний опір послідовного контуру $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ набуває вигляду $Z_0 = R$. Електричний пробій ЗПЕ ізоляції відповідає короткому замиканню конденсатора цього контуру, тобто $X_C = 0$. Тоді вхідний опір кола збільшується до $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$, а струм $I = U/Z$ зменшується. Так, для вищенаведеного прикладу

$$X_L = U_L/I = 500 \cdot 10^3/2 = 250 \text{ кОм}; \quad Z \approx X_L = 250 \text{ кОм}; \\ I_{\text{к.з.}} = U/Z = (10 \cdot 10^3)/(250 \cdot 10^3) = 0,04 \text{ А.}$$

Низький рівень нелінійних спотворень. Регульований дросель послідовного резонансного контуру налаштований на частоту вхідної напруги і завдяки високій добротності Q усі інші гармоніки затухають тим сильніше, чим більше номер (n) гармоніки: $U_{C(n)} = U/(n^2 - 1)$, $n > 1$. Отже, такий контур виконує дві функції: підвищує напругу на об'єкті випробувань і одночасно послаблює гармоніки спотворень, навіть за їх наявності у вхідній напрузі.

Відсутність перехідних напруг та дроселі на конденсаторі. Зазначене положення ґрунтується на аналізі перехідних процесів у послідовному контурі при його вмиканні на синусоїдну напругу, вимиканні та при електричному пробіі ємності, що відповідає дуговому перекриттю ізоляції кабелю. Ці процеси досліджувались на математичній моделі та перевірялись на реальній установці, створеній на заводі "Південкабель" (м. Харків, Україна).

Низький рівень розбалансування фаз. Оскільки вхідна потужність резонансних контурів досить мала, то відбір потужності з однієї фази трифазної мережі спричинює незначне розбалансування фаз і не порушує роботи інших споживачів, що живляться від даної мережі.

Опис випробувальної системи. Функціональна схема електротехнічної системи для вимірювання рівня часткових розрядів в ЗПЕ ізоляції надвисоковольтних кабелів приведена на рис. 1. До її складу входять такі компоненти:

– розділовий трансформатор Тр1, який виконує дві функції: гальванічне відокремлення даної системи від системи заземлення цеху і послаблення високочастотних шумів, які можуть виникати в системі живлення;

– головний автоматичний вимикач, який подає живлення до системи та забезпечує захист системи живлення при виникненні аварійних режимів;

- трансформатор Пашеля Тр2, який використано для регулювання вхідної напруги збуджувального трансформатора (такий регулятор має електропривод і пульта керування);
- високовольтний контактор, що з'єднує регулятор напруги з системою;
- низьковольтний фільтр для послаблення електромагнітних завад у діапазоні вимірювання рівня часткових розрядів;

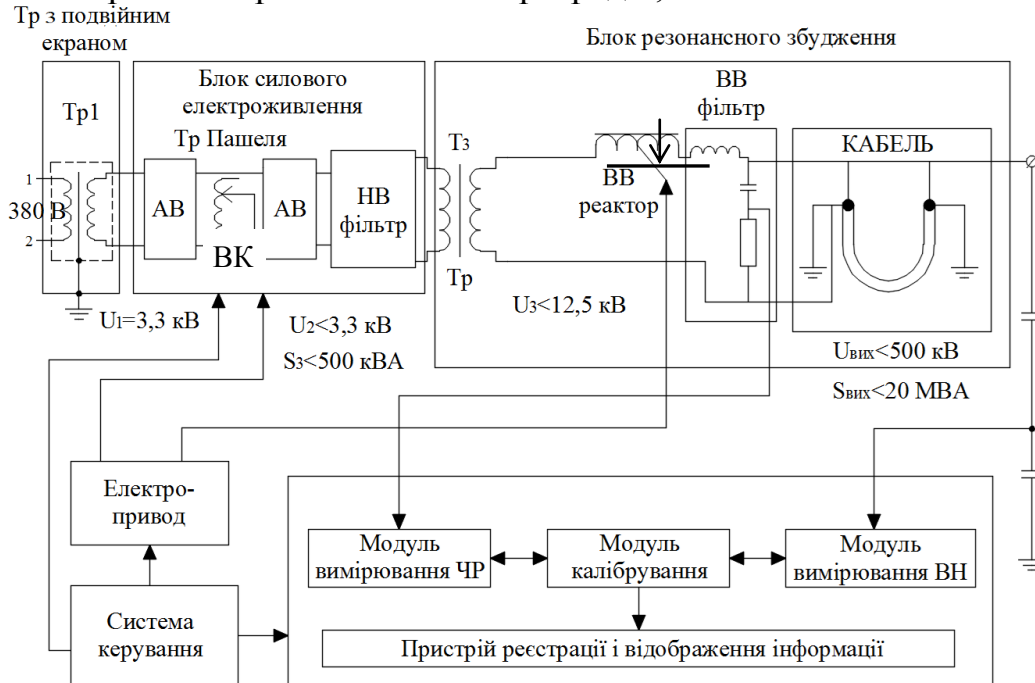


Рисунок 1 – Функціональна схема високовольтної випробувальної установки

– збуджувальний трансформатор Т3, призначений для підвищення напруги живлення до величини, необхідної для випробування кабелю, та для гальванічної розв'язки високовольтної вимірювальної системи з мережею живлення;

– високовольтний реактор, розміщений у сталевій камері, яка заповнена маслом і заземлена, причому два плеча магнітного осердя мають повітряні зазори, які змінюються підніманням та опусканням осердя за допомогою спеціального механізму, що змінює індуктивність реактора;

– високовольтний багатоступеневий фільтр, який входить до системи вимірювання часткових розрядів і має вихідну ступінь, що є подільником напруги і забезпечує подачу сигналів на кіловольтметр, детектор дугового розряду та детектор часткових розрядів.

Електричну схему заміщення установки подано на рис. 2. Вона містить чотири основні елементи: трансформатор збудження, регульований реактор, високовольтний фільтр низьких частот (ВВФНЧ) та кабель, що випробовується. Кожен елемент представлено своєю повною схемою заміщення, фізична сутність параметрів якої та методи їх розрахунку відомі.

Моделювання основних режимів роботи НВВК. Для моделювання перехідних процесів у колах діагностичного комплексу розроблено електричну

модель із застосуванням пакету прикладних програм Mathlab/Simulink/Sim/Power System і отримано наступні значення параметрів:

- джерело живлення: $U = 3,3$ кВ, $f = 50$ Гц, однофазне;
- трансформатор: $S = 500$ кВА, $U_{\text{НОМ}} = 3,13$ кВ, $U_{2\text{НОМ}} = 25$ кВ;
- реактор: $S_{\text{НОМ}} = 20000$ кВА, $U_{\text{НОМ}} = 50$ кВ, $L_{\text{max}} = 40$ Гн;
- силовий кабель з еталонною ємністю: $C = 0,25$ мкФ, $U = 500$ кВ;
- добротність контуру $Q = 40$;
- фільтр низьких частот: $L_{\phi} = 0,1$ Гн, $R_{\phi} = 0,1$ Ом, $C_{\phi} = 0,1$ мкФ, $\text{tg}\delta = 0,1\%$.

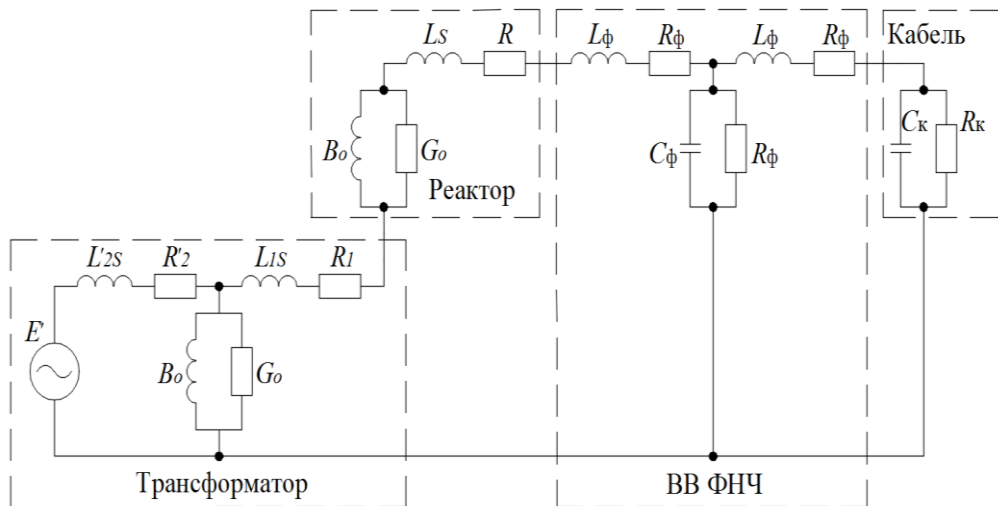


Рисунок 2 – Схема заміщення випробувальної системи

У роботі наведено вибірккові результати моделювання перехідних процесів.

На рис. 3 подано результати моделювання перехідного процесу при ввімкненні установки до джерела живлення.

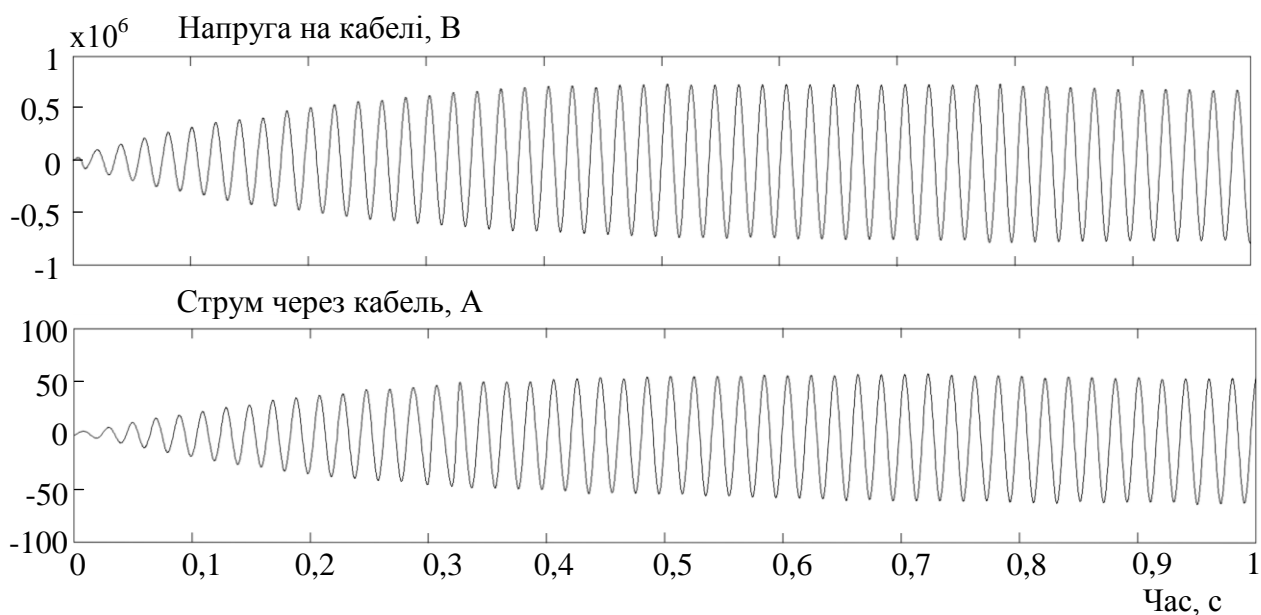


Рисунок 3 – Процес підключення системи до мережі електроживлення

На рис. 4 відображено результати моделювання перехідного процесу при відключенні від джерела живлення.

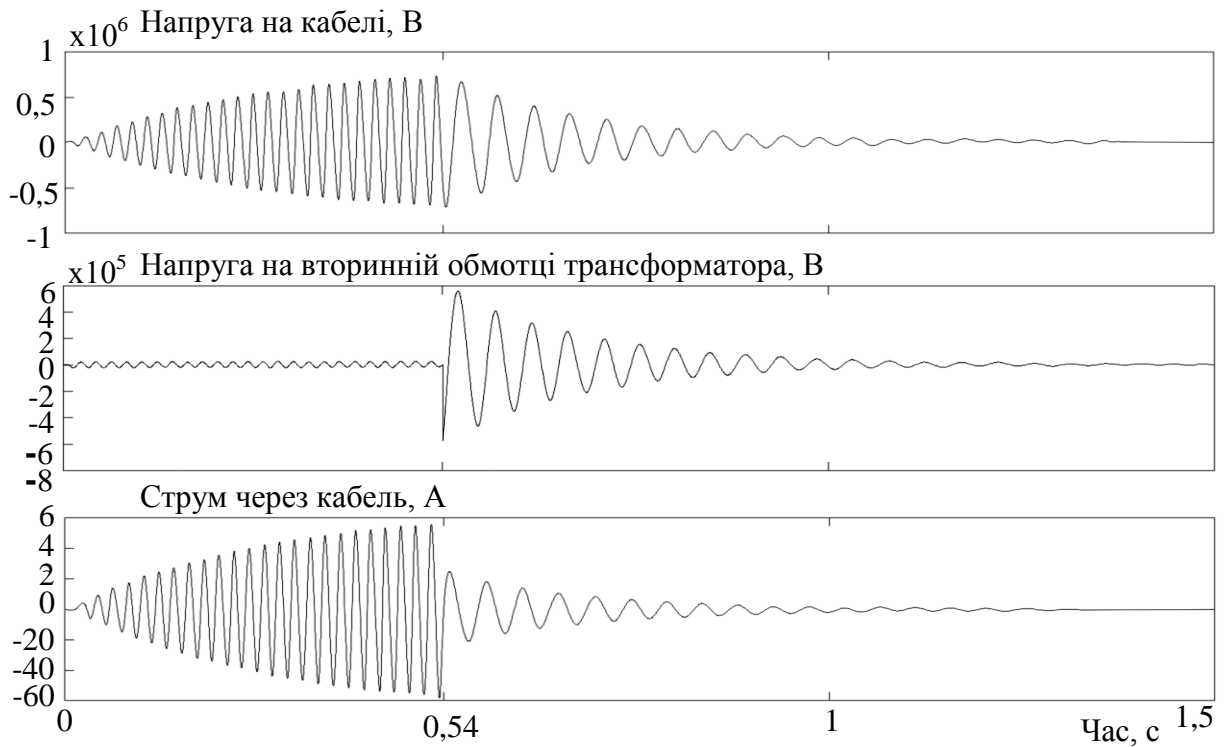


Рисунок 4 – Перехідний процес при відключенні установки від джерела живлення

На рис. 5 приведено результати моделювання перехідного процесу у разі перекриття ізоляції дугою.

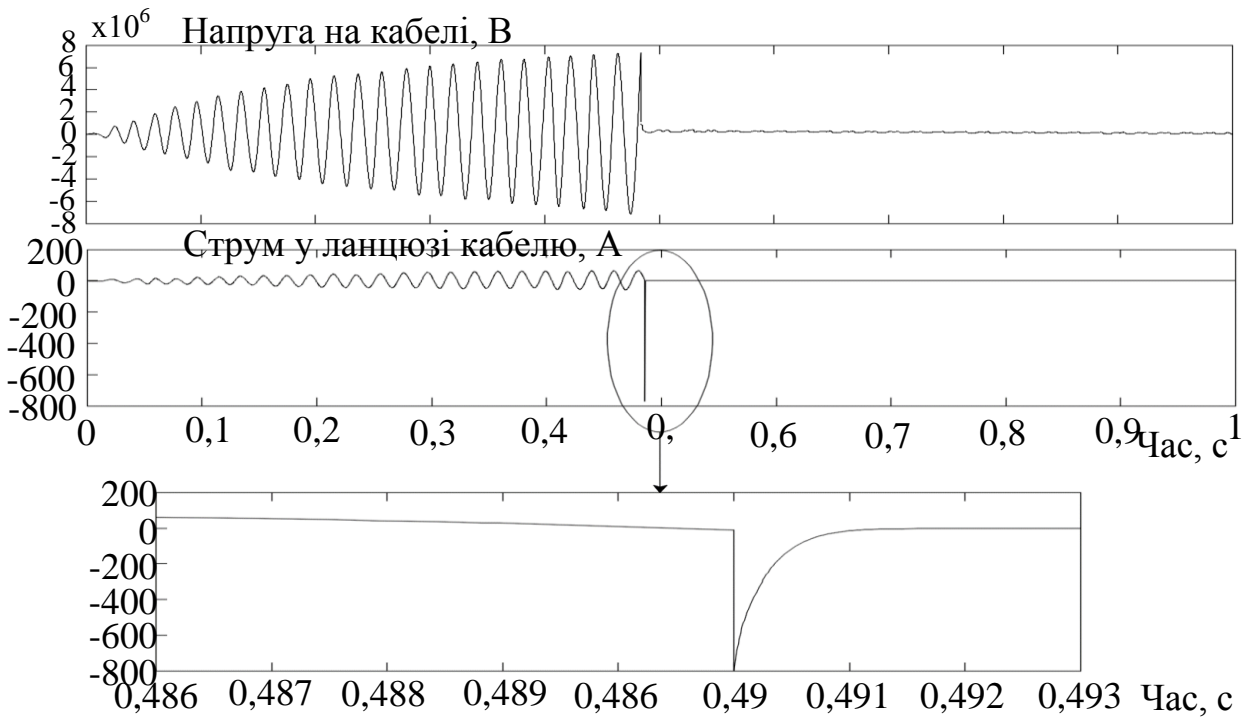


Рисунок 5 – Перехідний процес у разі пробую ізоляції

З рис. 3 видно, що усталені напруга $U = 500$ кВ і струм $I = 40$ А встановлюються на кабелі через 0,4 с після подачі на нього напруги.

На рис. 4 спостерігається стрибок напруги на вторинній обмотці трансформатора через велику індуктивність його обмотки намагнічування, причому ця індуктивність за величиною близька до індуктивності реактора. Для запобігання перенапруг на вторинній обмотці на ній доцільно встановити обмежувач напруги (розрядники або варистори). В той же час видно, що з часом напруга і струм у кабелі монотонно спадають до нуля.

Результати досліджень, приведені на рис. 5 свідчать, що виникненні електричних пробоїв в ізоляції кабелів не викликають аварійних перехідних процесів в обмотках реактора. Причому виникнення перехідних напруг у кабелі теж не становить загрози, оскільки виникаючий струм стрибкоподібно змінює свій напрям і набуває максимального значення 700 А (при цьому опір дуги приймався рівним 1 кОм).

Висновки.

1. Розроблена функціональна схема електротехнічної системи, яка використовує резонансний контур з послідовно з'єднаних силового кабелю зі ЗПЕ ізоляцією і реактору з регульованою індуктивністю здатна формувати однофазні синусоїдні напруги до 500 кВ частотою 50 Гц і є придатною для безпечної діагностики силових кабелів на напруги до 330 кВ шляхом вимірювання рівня часткових розрядів, виникаючих в їх ізоляції. Згідно європейських та українських стандартів рівень часткових розрядів не повинен перевищувати 10 пК.

2. Використання в електричних схемах електротехнічних систем діагностики кабелів високодобротного послідовного резонансного контуру забезпечує зменшення в 40 разів повної потужності, яка споживається системою діагностики від мережі електроживлення, та захищає їх від виникнення аварійних струмів при електричних пробоях ізоляції кабелів або реактора. При виникненні вказаних електричних пробоїв величина вхідного струму в резонансній системі діагностики зменшується в 40 разів за рахунок реалізації відповідного параметричного зв'язку.

3. Отримані результати використано при створенні електротехнічної системи резонансного типу для безпечної діагностики силових кабелів на напруги до 330 кВ шляхом вимірювання рівня часткових розрядів, виникаючих в їх ізоляції. Така система створена в приміщеннях заводу "Південкабель" (м. Харків) і атестована на допустимість проведення сертифікаційних випробувань високовольтних і надвисоковольтних кабелів.

Перелік посилань

1. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. – К.: Наш формат, 2013. – 550 с.

2. Золотарев В.М., Антоненко Ю.А., Золотарев В.В., Белянин Р.В., Науменко А.А. Выбор основных требований к электрическим испытаниям отечественных образцов кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // Вісник НТУ "ХПІ". Сер.: Техніка та електрофізика високих напруг. – 2014 - № 21. – С. 31-35.