

1. Пат. 96114250. Пристрій для регулювання реактивної потужності / М.С.Сегеда, П.Ф.Гоголюк, Е.Е.Сегев, П.А.Марушка. 19994. № 3. 2. Гоголюк П.Ф., Сегеда М.С. Математичне моделювання перехідних процесів електричних мереж з вентильними елементами та динамічним навантаженням // Техн. електродинаміка. 1998. № 3. С.60–62. 3. Перхач В.С., Скрипник А.И., Сегеда М.С. Программа анализа электромагнитных процессов электроэнергетических систем с вентильными устройствами в контурных координатах // Гос ФАП, № П006676. Укр. РФАП. 1983. № 6143. 93 с.

УДК 621.315.62.027.3.004.1.

**Собчук В.С., Пашенко В.Н., Собчук Н.В.**

Вінницький державний технічний університет

## **ВИМИКАЧ ВВБ-750 кВ ЯК ЗАГОСТРЮВАЧ ІМПУЛЬСНИХ НАПРУГ**

© Собчук В.С., Пашенко В.Н., Собчук Н.В., 2000

**Розглянуто вимикач ВВБ-750 кВ як загострювач імпульсних напруг грозового походження. Наслідком роботи вимикача як загострювача є порушення конструктивної координації ізоляції епоксидних вводів самого вимикача, що призвело до їх електричного пробою. Аналіз характеру дефектів, які виникають, свідчить про суттєве збільшення крутизни фронту грозового імпульсу до небезпечних значень. Побудована електрична схема заміщення вимикача ВВБ-750 кВ під час роботи в імпульсному режимі. Зроблено висновок про небезпеку для поздовжньої ізоляції обмоток електрообладнання від дії загострених грозових імпульсів.**

На ПС "Вінницька 750" вимикачем ВІ типу ВВБ 750-40/3200 виконувались багаторазові комутації ЛЕП 750 кВ "Вінницька 750", "Західно-Українська 750" в різних режимах роботи.

2 червня 1998 року під час виконання ВІ операції "Ввімкнення" для вводу ЛЕП в роботу черговим персоналом був виявлений виток повітря з покажчика продування системи вентиляції верхньої дугогасильної камери четвертого елемента полюса А, що є ознакою заповнення порожнини між фарфоровою покришкою і епоксидним вводом повітрям з надлишковим тиском.

Після розбирання модуля виявлені тріщини прохідного епоксидного вводу в районі торця вимірюючої обкладки з боку бака вимикача.

До цього випадку сталися аналогічні пошкодження ще трьох вводів вимикачів ВВБ 750-40/3200.УІ.

Полюс вимикача 750-40/3200 УІ має 16 одиничних розривів (рис.1), кожний з яких зашунтований двома паралельно включеними конденсаторами і має ливарні епоксидні вво-

ди. Отже, у вимкненому стані вимикач ВВБ 750 кВ є пристроєм, який в високовольтній імпульсній техніці називається загострювачем імпульсних напруг.

Вперше загострювач імпульсних напруг ВН для спеціальних випробувальних електротехнічних комплексів запропонував Fletcher [1] у 1949 році. Надалі глибокий теоретичний аналіз роботи загострювачів виконав відомий російський вчений Месяц Геннадій Андрійович [2], нині президент АН Росії (Сибірське відділення).

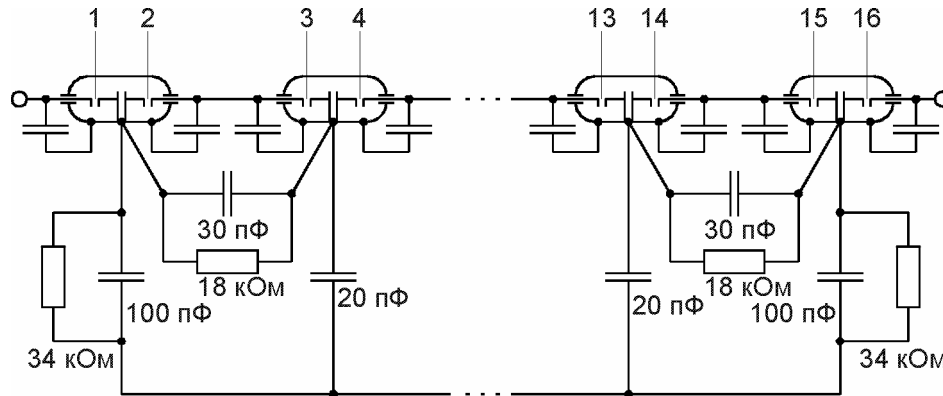


Рис.1. Принципова електрична схема вимикача ВВБ-750 кВ.

У лабораторії ТВН (техніки високих напруг) ВДТУ загострювач спеціальної конструкції був створений для експериментальної установки з вивчення можливості порушення конструктивної координації ізоляції ліній електропередачі професором Собчуком Валерієм Степановичем у 1974 році. Дослідження свідчать, що під час випробувань ізоляторів імпульсною напругою з великою крутизою фронту наскрізне пробиття ізолятора стає можливим [3].

Наскрізні електричні пробої ізоляторів не відбувались за дії одного випробувального імпульсу на бездефектний ізолятор. Механізм порушення конструктивної координації викладений детально в [4] і полягає в наступному. Подача на ізолятор імпульсу напруги з крутизою фронту більше 1 МВ/мкс призводить до перекриття ізолятора по поверхні через 0,1 мкс. На осцилограмі спостерігається відповідний зріз напруги. Висока напруженість електричного поля в фарфорі (епоксиді) існує дуже короткочасно (наносекунди). За цей час є можливість виникнення локального пробою, який просувається в поверхневий шар твердої ізоляції. Подальший розвиток розряду в глибину припиняється внаслідок зрізу напруги перекриттям і різким зниженням напруженості поля в тілі.

Фактична товщина ізоляційного тіла в цьому місці зменшується на значення шляху часткового пробою. Наступні імпульси просувають канал часткового розряду в глибину. Старт кожного подальшого часткового пробою відбувається за зростаючих значень середньої і максимальної напруженостей електричного поля в ізоляційному тілі. У міру просування каналів часткових пробоїв в глибину координуючий коефіцієнт зменшується, тобто ізолятор переходить у нову якість – стає дефектним. Така багатоступенева модель порушення координації ізоляції, яка основана на кумулятивному ефекті часткових пробоїв, повністю відповідає експериментальним фактам.

Використаний в [4] осцилографічний метод дослідження процесу пробоїв ізоляторів в принципі не чутливий до зародження і розвитку часткових пробоїв, тому що перекриття (розряд вздовж поверхні) екранує виявлення цих процесів на осцилограмі. Прикладання

передостаннього (відносно кінцевого ефекту) імпульсу завершує формування каналу наскрізного пробою до стадії рівних ймовірностей пробою і перекриття, тому наступний імпульс діє на дефектний ізолятор.

Дослідити поетапно появу і розвиток часткових пробоїв у твердому ізоляторі за допомогою електричних випробувань не є можливим, тому що кожний завершений розряд відбувається по поверхні ізоляторів, а напруга перекриття в 1,6–1,8 разів менша від напруги пробою по товщині і зріз напруги кожний раз відбувається на цьому рівні.

Коли часткові електричні пошкодження в ізоляторі призведуть до появи рівномірних шляхів формування електричного розряду по тілу і поверхні, то зріз напруги на осцилограмі знов-таки буде на рівні напруги перекриття ізолятора і тільки дефектний ізолятор з наскрізним каналом дає на осцилограмі зріз напруги за умови суттєво пониженого значення.

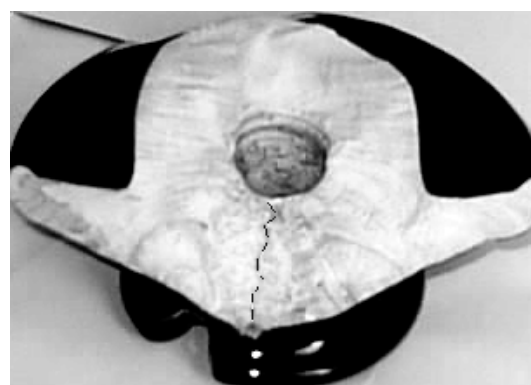
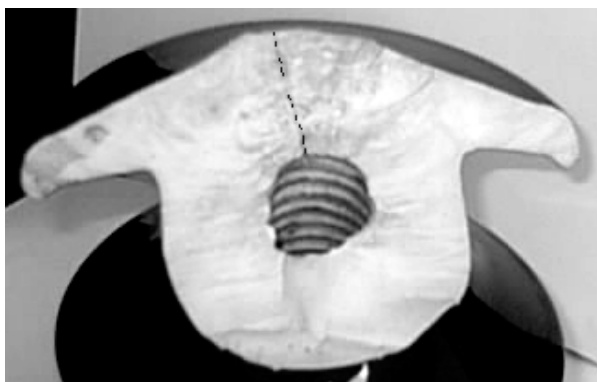


Рис.2. Характерні шляхи імпульсного пробою ізоляторів.

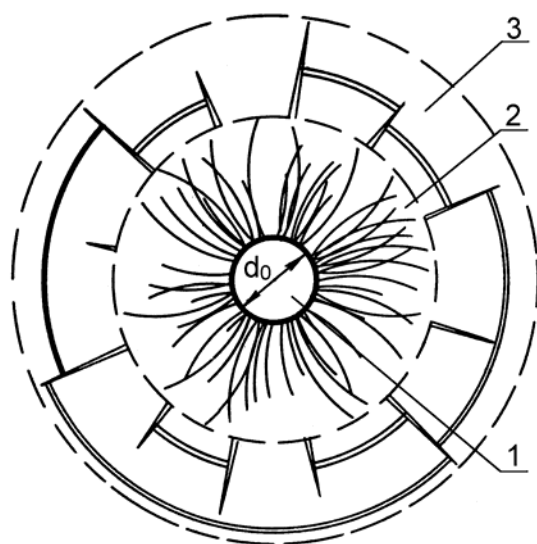


Рис.3. Комбінована схема зон руйнування при імпульсному пробіі ізолятора:

які виникають з обох сторін капілярів, вимірювались за допомогою оптичного приладу МПБ-2, збільшення 24\*, ціна поділки 0,05 мм. Воронки мають форму зрізаного конуса з більшим радіусом 1,5...5 мм, але меншим ніж у капіляра.

Імпульсна напруга з крутим фронтом призводить до електричного пробою ізоляторів по характерних шляхах (рис.2). Сліду розплавлення скла або поливи на пробитих лінійних ізоляторах не було, а в епоксидних вводах є продукти електроерозійного пошкодження.

Основні геометричні розміри капілярів пробитих ізоляторів – радіус і довжина. Довжина капіляра визначається типом ізолятора і для епоксидних вводів становить 40...45 мм.

Радіус капіляра не залежить від типу ізолятора і змінюється у вузькому діапазоні значень 0,2...0,3 мм. Геометричні розміри кратерів відкольних воронок не залежать від типу ізолятора і визначаються міцнісними характеристиками матеріалу. Розміри відкольних воронок,

На рис.3 показано схематичне зображення інтегральної картини дефектів в ізоляторі у разі його імпульсного пробою. Ділянки епоксиду, які безпосередньо примикають до каналу пробою, дробились до дрібнодисперсної структури, утворюючи зону роздавлювання. Тут і надалі при описуванні наслідків пробою і руйнування ізоляторів використані терміни, які взяті з теорії руйнування твердих тіл вибухом. Це не випадково, тому що математичні моделі, які побудовані для описання руйнування твердих речовин вибухом вибухівки, розміщеної в шпурі, аналогічні моделям руйнування ізоляторів після електричного пробою імпульсами.

Біля вхідного і вихідного отворів капілярів виникають відкольні воронки. Від периферійних областей зони роздавлювання в напрямку зовнішніх поверхнів ізоляторів спостерігається мережа радіальних і кільцевих тріщин. Вони утворюють зону розтріскування. Після первинного пробою ізолятора тріщини не розкриті, тому візуально спостерігаються волоссяними [4].

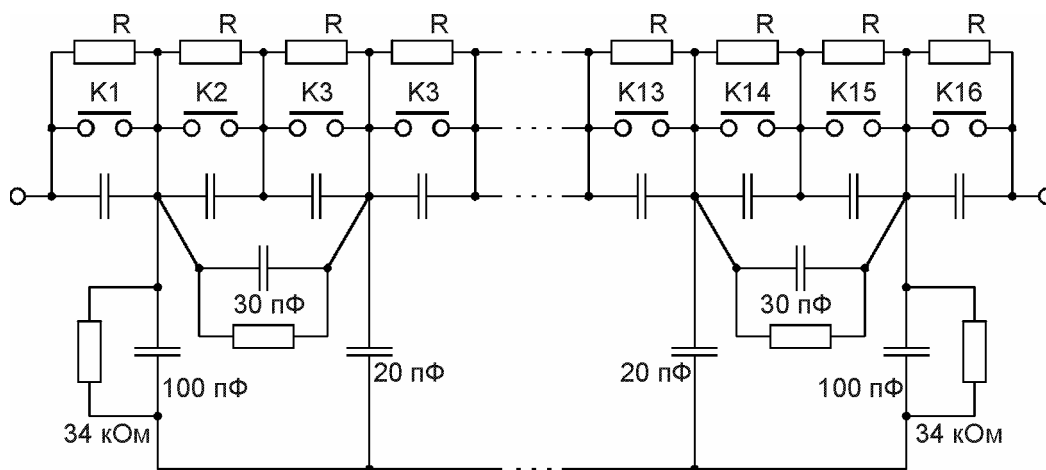


Рис.4. Схема заміщення загострювача

Вхідна і вихідна відкольні воронки з'являються після того, як азимутна ударна хвиля, дійшовши до поверхні ізолятора, відбивається від неї, внаслідок чого виникають розтягуючі механічні напруги, які руйнують горло каналу електричного пробою. Відкольні воронки зменшують довжину капіляра на їх сумарну глибину, що впливає на залишковий рівень ізоляції в цьому місці.

Подальші експериментальні дослідження дали змогу з'ясувати, що розрядний градієнт по капіляру у разі випробування імпульсною напругою стандартної форми становить  $(10 \pm 1)$  кВ/см.

Проаналізуємо детальніше роботу вимикача ВВБ-750 як загострювача. Схема заміщення загострювача зображена на рис.4. Тут  $C_2$  – ємності між електродами;  $C_3$  – ємності електродів на землю (бак);  $R$  – опір витoku;  $\rho$  – хвильовий опір ліній. Пробій проміжків імітується замиканням ключів  $K$ . Опори  $R$  зазвичай такі великі, що не впливають на імпульсний процес у схемі.

Хай  $2\rho \cdot C_e \ll t_{3min}$ , де  $t_{3min}$  – мінімальний час затримки пробою зазору;  $C_e$  – еквівалентна ємність вимикача по відношенню до вхідних затискачів;  $\rho$  – хвильовий опір ліній  $L_1$  і  $L_2$ .

Зазвичай фронт  $t_{\phi 1}$  імпульсу грозового походження більше  $t_{z \min}$ , тому аналіз перехідного процесу в схемі можна виконувати без урахування впливу хвильового опору  $\rho$  ліній і вважаючи, що після пробією кожного зазора на решті не пробитих зазорах встигає установитись напруга відповідно до значень ємностей  $C_2$  і  $C_3$ .

У цьому випадку розрахункову схему заміщення можна представити у вигляді ланцюгової схеми з "m" елементів, де  $m = 16$ . Імпульсна напруга по електродах вимикача після пробією  $\gamma$  проміжків розподіляється

$$U_{k+1} = 2U \cdot \frac{\text{sh}(m-k)\gamma}{\text{sh}(m-j)\gamma}, \quad (1)$$

де  $\gamma = \ln \left[ 1 + \frac{C_3}{2C_2} \left( 1 + \sqrt{\frac{4C_2}{C_3} + 1} \right) \right]$ ;  $K$  – порядковий номер електрода.

У разі, якщо  $\frac{C_3}{C_2} < 2$ , то  $\gamma$  можна визначити з простішої формули

$$\gamma = \sqrt{\frac{C_3}{C_2}}.$$

З (1) можна знайти перепад напруги на будь-якому проміжку. Наприклад, для  $\gamma = 0$ , тобто перед пробією першого проміжку на першому проміжку буде напруга

$$\Delta U_1 = U_1 - U_2 = 2U \cdot \left[ 1 - \frac{\text{sh}(m-1)\gamma}{\text{sh}m\gamma} \right]. \quad (2)$$

Якщо  $\gamma \gg 1$ , а  $m > 3$ , то

$$\Delta U_1 = 2U \cdot [1 - \exp(-\gamma)].$$

Отже, за  $\gamma = 1$  на першому проміжку перед пробією буде 63 % від подвоєної амплітуди імпульсу напруги, а за більших значень буде ще більше.

Перепад напруги на  $k$ -му проміжку після пробією  $\gamma$  проміжків визначають з формули

$$\Delta U_k = U_k - U_{k+1} = 4U \text{sh} \frac{\gamma}{2} \cdot \frac{\text{ch} \left( m - k + \frac{1}{2} \right) \gamma}{\text{sh}(m-j)\gamma}. \quad (3)$$

У нашому випадку  $m = 16$ ,  $j = 3$ ,  $m - j = 13 > 3$ ,  $\gamma = 10$ , то напруга на проміжку  $\gamma + 1 = 4$  практично не залежить від  $\gamma$  і її визначають за формулою

$$\Delta U_4 \approx 2U \cdot [1 - \exp(-10)] = 2U,$$

де  $U$  – напруга спрацювання розрядника РБМК-750;  $U \leq 1500$  кВ, тому  $\Delta U_4 = 3000$  кВ.

Швидкість зростання напруги на фронті імпульсу збільшується в 10 разів, тому  $\frac{du}{dt} = \frac{1500}{0,15} = 10$  МВ/мкс. Цієї швидкості зростання достатньо для порушення координації напруги пробією і перекриття будь-якого ізоляційного елемента, зокрема ливарній частині вводу. Особливо небезпечні такі імпульси для поздовжньої ізоляції обмоток трансформаторів (силових і вимірювальних), реакторів (шунтуючих) на системних підстанціях.

### Висновки

1. Вимикачі ВВБ-750 кВ є загострювачами імпульсних напруг грозового походження.
2. Після перетворення у вимикачі фронт імпульсу грозового походження скорочується в 10 разів.
3. Імпульси напруги зі швидкістю зростання більше 1,5...2 МВ/мкс особливо небезпечні для поздовжньої ізоляції обладнання ПС.
4. Дефекти в епоксидних вводах ВВБ-750 кВ є наслідком порушення конструктивної координації ізоляції і кумулятивного ефекту від серії грозових імпульсів.

1. Fletcher R.C., Rev. Sci. Instrum. 20.12. 1949. 2. Месяц Г.А. Исследования по генерированию наносекундных импульсов большой мощности: Автореф. дис. ...д-ра техн. наук. Томск, 1966. 3. Собчук В.С. Экспериментальное исследование механизма разрушения линейных изоляторов при электрическом пробое // Электрические станции. 1975. № 2. С.71–72. 4. Собчук В.С. Импульсный метод профилактических испытаний штыревых изоляторов: Автореф. дис. ...канд. техн. наук. К., 1983.

УДК 62.50:658:012:378.1

Стахів П.Г., Коруд В.І., Гамола О.Є.  
ДУ “Львівська політехніка”, кафедра ТЗЕ

## МЕТОДИКА ТА ДИДАКТИКА КОМП'ЮТЕРНОГО ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ З ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

© Стахів П.Г., Коруд В.І., Гамола О.Є., 2000

**Розглянуті особливості методики та дидактики формування лабораторного практикуму з електротехніки в системі комп'ютерного навчання. Відзначені переваги й недоліки комп'ютерних технологій в напрямку лабораторного практикуму, а також доведена необхідність наявності дидактичного забезпечення технологій. Обґрунтована методика формування такого лабораторного практикуму з потужним комп'ютерним забезпеченням.**

Одним з важливих компонентів навчального процесу є лабораторний практикум, а щодо вивчення електротехнічних дисциплін він займає чільне місце й є найважливішим етапом пізнання суті фізичних процесів [1]. Активне впровадження нових інформаційних технологій у навчальний процес висвітлює проблему методології та дидактики комп'ютерного лабораторного практикуму (КЛП). Під час навчання, зокрема під час вивчення електротехніки, від студента вимагається не тільки фіксація зовнішніх проявів електротехнічних явищ, але й глибоке усвідомлення цих процесів і керування ними.