

Є. І. БАЙДА, О. М. ГРЕЧКО

МУЛЬТИФІЗИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ТОПКИХ ЗАПОБІЖНИКІВ  
ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ

**Вступ.** В електричній мережі середньої напруги 6-35 кВ існує проблема захисту вимірювальних трансформаторів напруги. Це пов'язано з недостатньо ефективним рівнем їх захисту за допомогою топких запобіжників. Останнім часом все частіше з'являються повідомлення щодо аварій, пов'язаних із виходом з ладу вимірювальних трансформаторів напруги не тільки в Україні, а і за кордоном. Актуальним є питання проведення аналітичного дослідження проблеми захисту топкими запобіжниками вимірювальних трансформаторів середньої напруги. **Мета.** Дослідження конструкцій та характеристик топких запобіжників для вимірювальних трансформаторів середньої напруги для підвищення ефективності їх захисту. **Результати.** В статті показано, що захист вимірювальних трансформаторів середньої напруги з епоксидною ізоляцією часто забезпечується топкими запобіжниками, у яких номінальним струмом топкої вставки є значно більшим за граничнодопустимий тривалий струм первинної обмотки вимірювального трансформатора. Проведено порівняльний аналіз значень струму первинної обмотки вимірювальних трансформаторів середньої напруги зі значеннями номінальних струмів топких вставок запобіжників різних виробників, що представлені на ринку України. Досліджено конструктивні особливості та технічні характеристики топких запобіжників для вимірювальних трансформаторів середньої напруги з метою підвищення ефективності їх захисту. Досліджено переваги та недоліки конструкцій топких запобіжників різних виробників, та встановлено, що потребує подальшого вдосконалення конструкція топких запобіжників з метою підвищення ефективності захисту вимірювальних трансформаторів середньої напруги. **Обговорення та перспективи подальшого розвитку.** Оскільки в Україні потреби у топких запобіжниках для захисту вимірювальних трансформаторів середньої напруги забезпечуються переважно поставками за кордону, то перспективним напрямком подальшого розвитку у цьому напрямі є створення вітчизняної конкурентоспроможної конструкції топкого запобіжника та впровадження його у виробництво.

**Ключові слова:** вимірювальний трансформатор середньої напруги, топкий запобіжник, захист трансформаторів напруги, струм первинної обмотки вимірювального трансформатора.

Y. BAJDA, O. GRECHKO

MULTIPHYSICS CALCULATION OF FUSES OF MEDIUM VOLTAGE MEASURING  
TRANSFORMERS

**Introduction.** In the medium voltage power grid of 6-35 kV, there is a problem of protecting voltage instrument transformers. This is due to the insufficiently effective level of their protection with fuses. Recently, there have been more and more reports of accidents associated with the failure of voltage instrument transformers not only in Ukraine, but also abroad. The issue of conducting an analytical study of the problem of protection of medium voltage instrument transformers by fuses is relevant. **Goal.** Investigation of designs and characteristics of fuses for medium voltage instrument transformers to improve the efficiency of their protection. **Results.** The article shows that protection of medium voltage instrument transformers with epoxy insulation is often provided by fuses, in which the nominal current of the combustion insert is significantly higher than the maximum permissible long-term current of the primary winding of the instrument transformer. A comparative analysis of the current values of the primary winding of medium voltage instrument transformers with the values of the nominal currents of the fusing inserts of fuses of various manufacturers presented on the Ukrainian market is carried out. The design features and technical characteristics of fuses for medium voltage instrument transformers have been investigated in order to increase the efficiency of their protection. The advantages and disadvantages of the designs of fuses from various manufacturers have been investigated and it has been established that the design of fuses requires further improvement in order to increase the efficiency of protection of medium voltage instrument transformers. **Discussion and prospects for further development.** Since in Ukraine, the need for fuses to protect medium voltage instrument transformers is provided mainly by supplies abroad, a promising direction for further development in this direction is the creation of a domestic competitive design of a fuse and its introduction into production.

**Keywords:** medium voltage instrument transformer, fuse, voltage transformer protection, instrument transformer primary winding current.

**Вступ.** Вимірювальний трансформатор напруги (ВТН) є невід'ємною частиною електричної мережі середньої напруги 6-35 кВ від якого залежить точність електричних вимірювань та обліку електричної енергії, а також надійність роботи релейного захисту та противарійної автоматики.



Рис. 1. Типова конструкція ВТН з литою ізоляцією

На теперішній час ВТН мають конструкцію, у якій використовується так звана лита ізоляція (рис. 1).

- відсутність необхідності обслуговування;
- більший строк служби;
- пожежна безпека та інші.

Однією з важливих задач, що забезпечує надійність передачі електричної енергії, є захист ВТН у випадку виникнення аварійних режимів роботи таких як перевантаження, ферорезонансні явища та інше [1-12]. Причини виникнення перенапруг та резонансних режимів надзвичайно різноманітні: коротке замикання на землю; спрацювання запобіжника в одній з фаз; удари блискавки; відключення холостого ходу трансформатора тощо. Найбільш поширена причина появи перенапруг – коротке замикання фази на землю через дугу, що то з'являється, що та гасне. У результаті цього можуть виникнути резонансні явища і небезпечні перенапруги [13-18].

Також перенапруги та резонансні явища залежать

© С.І. Байда, О.М. Гречко, 2023

від засобу заземлення нейтралі. Як правило, такі явища виникають у лініях з ізолюваною нейтраллю, еквівалентна схема якої з підключеним ВТН показана на рис. 2. Як показують дослідження [3, 11, 19], найбільш перспективними з точки зору зменшення перенапруг і усунення резонансних явищ є схеми заземлення нейтралі через опір і/або дугогасильний реактор. Іншим засобом захисту ВТН від аварійних режимів є використання антирезонансних трансформаторів, які є більш складними за конструкцією і, відповідно, менш надійними [1, 2, 10, 13, 20]. На практиці ж спостерігається явище, коли антирезонансні трансформатори, як і в першому випадку, при вмиканні самі викликають ферорезонанс і зміщення нейтралі за допустимі межі.

На рис. 3 змодельоване виникнення ферорезонансу в мережі з ізолюваною нейтраллю після короткочасного короткого замикання на землю.

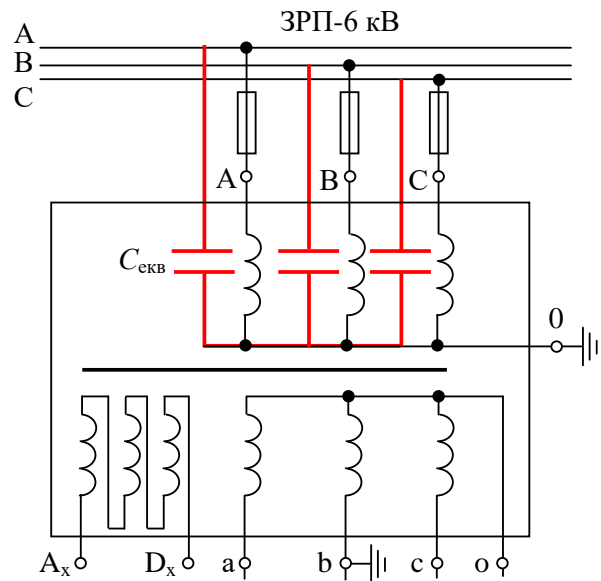


Рис. 2. Схема лінії з ізолюваною нейтраллю та ВТН

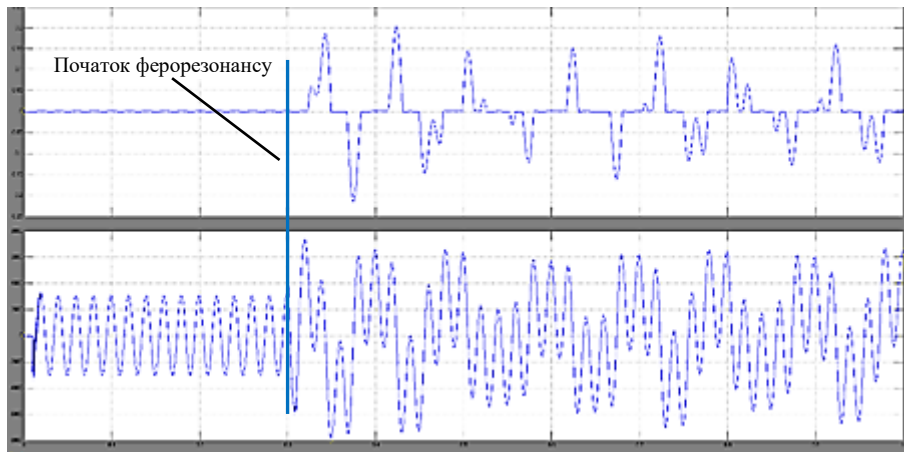


Рис. 3. Порівняльні значення струму первинної котушки і напруги на виході ВТН до і після початку ферорезонансного явища

Тому, найбільш надійним засобом захисту від аварійних режимів роботи ВТН є топкі запобіжники з відповідними номінативними струмами [9, 21-26]. Так, для захисту ВТН застосовуються топкі запобіжники, що встановлюються зі сторони первинних обмоток високої напруги окремо на ізоляційних опорних ізоляторах (рис. 4, а, б) у розподільному пристрої або безпосередньо вмонтовуються у конструкцію ВТН (рис. 4, в). Інші захисні апарати для захисту ВТН на практиці не застосовуються.

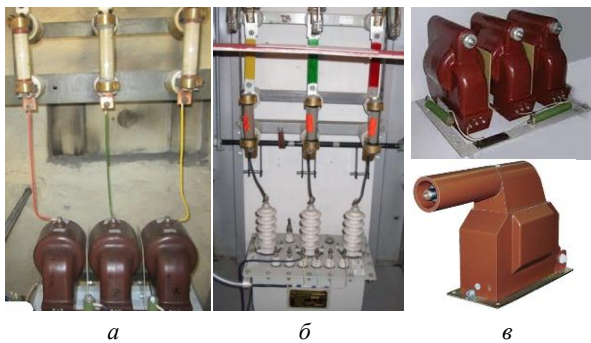


Рис. 4. Приклади встановлення топких запобіжників

**Обґрунтування актуальності. Постановка проблеми.** Практикою встановлено, що топкі запобіжники є найбільш ефективними засобами захисту електричних мереж і обладнання від надструмів – перевантажень і коротких замикань, які завдяки струмообмежувальному ефекту швидко відмикають аварійний струм. Але це стосується тих випадків у мережах низької напруги до 1000 В, середньої – 6-35 кВ та високої – понад 35 кВ, коли надструми достатньо великі. Вимоги до таких запобіжників викладені в [27-30]. Зовсім інша ситуація трапляється у випадку виникання невеликих струмів перевантаження – є приклади, коли запобіжники є неспроможними ефективно впоратись з незначним збільшенням струму у колі, що захищається. Ще більш складна ситуація виникає у випадку коли номінальні струми мережі становлять величину порядку десятків міліампер. Вітчизняні підприємства виробляють запобіжники для захисту ВТН типу ПКН, номінальний струм якого *не нормується* і це в тому випадку, коли номінальний струм багатьох ВТН складає величину порядку декількох десятків міліампер. Малі значення струму пов'язано з тим, що ВТН працює практично в

режимі холостого ходу і струм первинної котушки визначається співвідношенням:

$$u_1 \cdot i_1 = u_2 \cdot i_2 + P, \quad i_2 \approx 0 \Rightarrow i_1 = \frac{P}{u_1}, \quad (1)$$

де  $u$  – напруга на обмотках трансформатора;  $i$  – струм;  $P$  – потужність втрат в трансформаторі; індекс «1» відноситься до первинної обмотки, індекс «2» – до вторинної обмотки ВТН.

Гранично допустимий струм більшості ВТН знаходиться в діапазоні (0,14-0,1) А. Тобто, умовний струм розчеплення  $1,6 \cdot I_n$  дорівнює (224–160) мА. Проблема ця є достатньо актуальною, бо останнім часом у відкритому інформаційному просторі все частіше з'являються повідомлення щодо аварій, пов'язаних із виходом з ладу ВТН не тільки в Україні, а і за кордоном [6, 8, 10, 11, 15, 19, 23].

Це пов'язано з тим, що допустимі струми ВТН погано узгоджуються з захисними характеристиками топких запобіжників. На рис. 5 показані захисні характеристики доволі розповсюдженого топкого запобіжника у якості топкого елемента в якому використовується резистор C2-33-H-0,25 з опором (9-11) Ом.

Порівнявши гранично допустимий струм та захисну характеристику, можна констатувати, що мінімальний струм спрацьовування запобіжника в 4,3 – 6 разів перевищує гранично допустимий струм ВТН. Тому, **актуальним** постає питання дослідження проблеми захисту топкими запобіжниками вимірювальних трансформаторів середньої напруги з номінативними струмами в декілька десятків міліампер.

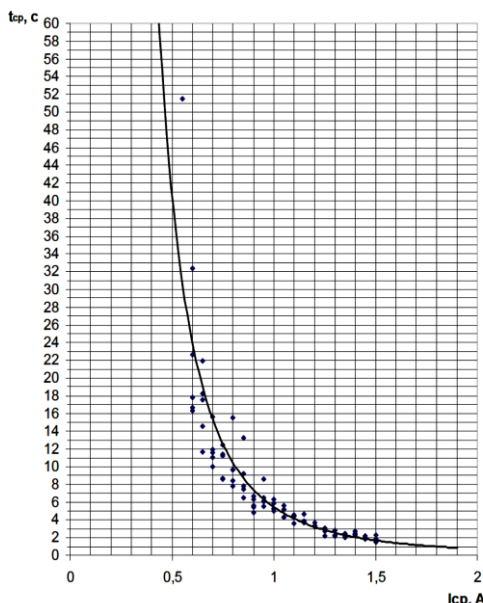
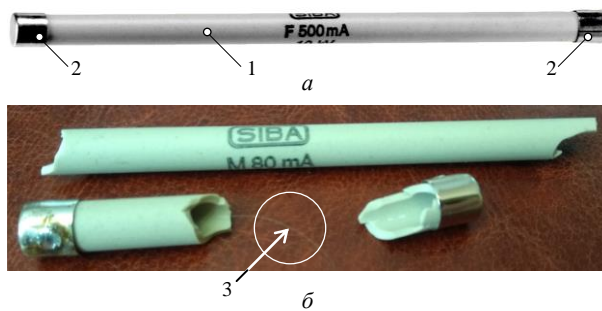
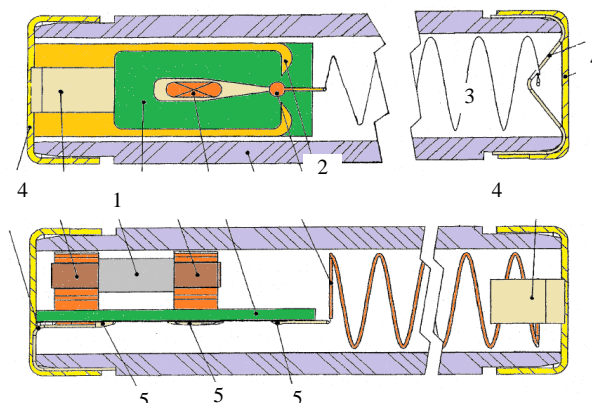


Рис. 5. Захисна характеристика топкого запобіжника в якому у якості топкого елемента використовується резистор

Детально конструкції топких запобіжників розглянуто в [31], з яких найбільш розповсюдженими є дві конструкції: запобіжник Type 187000 виробництва SIBA (Німеччина), який зображено на рис. 6, та запобіжник VPO 38-T0080 (Чеська Республіка), який зображено на рис. 7.



1 – корпус; 2 – наконечники; 3 – топкий елемент  
Рис. 6. Зовнішній вигляд (а) та конструкція (б) топкого запобіжника Type 187000 виробництва SIBA



1 – топкий елемент; 2 – дугові контакти; 3 – пружина; 4 – термінали; 5 – місця пайки  
Рис. 7. Конструкція топкого запобіжника VPO 38-T0080

Характеристики цих запобіжників, проведені в [31] і дають змогу зробити наступні висновки:

- судячи з наведеної в каталозі часо-струмової характеристики запобіжники Type 187000 і VPO 38-T0080 можуть слугувати ефективним захистом ВТН середньої напруги з епоксидною ізоляцією;
- відкритим залишається питання щодо точного встановлення діаметру та матеріалу топкої вставки;
- суттєвим недоліком даних запобіжників є їх висока вартість та можливість покупки тільки за кордоном, оскільки на теренах України вони практично відсутні.

Для аналізу факторів, що впливають на роботу топкого запобіжника, розглянута проста теплова модель одновимірного нагріву провідника зі струмом без урахування залежності питомого електричного опору від температури для матеріалу ніхром за умови, що провідник достатньо довгий і його кінці не впливають на температуру у точці, що розглядається:

$$\begin{cases} C_g \cdot \frac{d\vartheta}{dt} + \frac{K_t \cdot P}{S} \cdot (\vartheta - \vartheta_0) - \rho \cdot \left( \frac{i}{S} \cdot K_i \right)^2 = 0; \\ \vartheta(0) = \vartheta_0, \end{cases} \quad (2)$$

де  $\vartheta$  – температура;  $\vartheta_0$  – початкова температура;  $C_g$  – об'ємна теплоємність;  $K_t$  – коефіцієнт тепловіддачі;  $P$  – периметр топкого елемента;  $S$  – площа перетину топкого елемента;  $i$  – номінальний струм;  $K_i$  – коефіцієнт кратності номінативного струму.

Розв'язання цього рівняння має вигляд:

$$\begin{aligned} \vartheta &= \vartheta_0 + \frac{\rho \cdot i^2}{S \cdot K_t \cdot P} \cdot K_i^2 \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{K_t \cdot P}{S \cdot C_g} \cdot t\right) \right) = \\ &\vartheta_0 + (\vartheta_u - \vartheta_0) \cdot K_i^2 \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{K_t \cdot P}{S \cdot C_g} \cdot t\right) \right), \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\vartheta_u$  – стала температура в номінальному режимі.

Швидкість зростання температури буде:

$$V_\vartheta = \frac{\rho \cdot i^2}{S^2 \cdot C_g} \cdot K_i^2 \cdot \exp\left(-\frac{K_t \cdot P}{S \cdot C_g} \cdot t\right). \quad (4)$$

Рівняння (3), (4) дають можливість *приблизно оцінити* вплив тих чи інших параметрів на температуру нагріву топкової вставки. Зокрема, з (3) випливає, якщо при  $K_i = 1,6$  температура топкової вставки повинна досягнути температури топлення за період, який дорівнює сталій часу, то стала температура в номінальному режимі повинна бути:

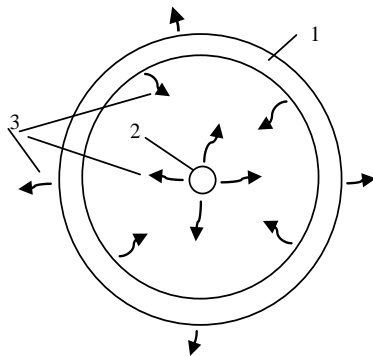
$$\vartheta_u \geq 0,63 \cdot \vartheta_p, \quad (5)$$

де  $\vartheta_p$  – температура топлення.

Формули (3-5) є досить приблизними, бо конструкція топкового запобіжника більш складна, та головне – це невідоме значення коефіцієнту тепловіддачі, який складається з радіаційної і конвекційної частин та залежить від багатьох факторів (температура, геометрія об'єкту, взаємне положення тіл, що нагріваються та ін.) і не є сталою величиною (може збільшуватися на порядок за рахунок радіаційної частини). Таким чином, для дослідження та проектування топкових запобіжників потрібно проведення розрахунків, які б враховували процеси теплопередачі в тілах та газах з урахуванням конструкції запобіжника та поверхневих процесів обміну тепловими потоками.

**Мета статті** полягає у розробці та дослідженні математичної моделі топкових запобіжників з урахуванням їх конструкцій та характеристик для підвищення ефективності захисту вимірювальних трансформаторів середньої напруги та порівняння отриманих результатів з наведеними у каталозі на наявні зразки.

**Математична модель топкового запобіжника.** Зображення розрахункової моделі, за яким здійснювалось моделювання, показано на рис. 8.



1 – корпус; 2 – топка вставка; 3 – теплообмін з оточуючим середовищем

Рис. 8. Зображення розрахункової моделі

Допущення, прийняті при розрахунках:

- 1) вважаємо, що топка вставка досить довга і на температуру в її середній частині кінці не впливають;
- 2) опір топкової вставки залежить від її температури;
- 3) усередині та зовні запобіжника теплообмін існує за рахунок конвекції та випромінювання;
- 4) температура оточуючого середовища дорівнює 30 °С.

Таким чином, необхідно розрахувати процес нестационарного нагріву системи, яка складається з твердих тіл та рухомого газового середовища з урахуванням внутрішніх джерел тепла та граничними умовами на межах складових системи за рахунок теплообміну теплопровідністю, конвекційними та радіаційними потоками тепла [33].

Розрахункові рівняння мають наступний вигляд [33] для кожної з областей.

Розповсюдження тепла в твердому тілі:

$$C(T) \cdot \rho(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k(T) \cdot \nabla T) = Q(T) \cdot \delta, \quad (6)$$

де  $C$  – теплоємність;  $\rho$  – щільність;  $T$  – температура;  $k$  – теплопровідність;  $Q$  – внутрішні джерела тепла;  $\delta$  – дельта функція, яка дорівнює нулю, якщо в тілі немає внутрішніх джерел тепла.

Розповсюдження тепла в оточуючому просторі (повітря):

$$\begin{aligned} C(T) \cdot \rho(T, p) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k(T) \cdot \nabla T) = \\ - \rho(T, p) \cdot C(T) \cdot \mathbf{u} \cdot \nabla T \end{aligned}, \quad (7)$$

де  $p$  – тиск;  $\mathbf{u}$  – швидкість оточуючого середовища.

Рівняння руху середовища:

$$\begin{aligned} \rho(T, p) \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\rho(T, p) \cdot \mathbf{u} \cdot \nabla) \cdot \mathbf{u} = \\ \nabla \cdot \left[ -p \cdot \mathbf{I} + \eta(T) \cdot (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \cdot \nabla \mathbf{u} \cdot \mathbf{I} \right] + \mathbf{F} \end{aligned}, \quad (8)$$

де  $\eta$  – динамічна в'язкість;  $\mathbf{F}$  – підйомна сила.

Початкові умови – початкова температура та нерухомість середовища.

Граничні умови на зовнішній границі корпусу запобіжника:

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = h \cdot (T_\infty - T) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{amb}^4 - T^4), \quad (9)$$

де  $\mathbf{n}$  – нормаль;  $\mathbf{q}$  – тепловий потік;  $h$  – коефіцієнт тепловіддачі який розраховувався з урахуванням критеріїв Нулельта, Грасгофта та Прандлія при ламінарній течії;  $T_\infty$  – температура віддаленої точки;  $\varepsilon$  – ступінь чорноти;  $\sigma$  – стала Больцмана;  $T_{amb}$  – оточуюча температура.

Для внутрішніх границь [33] вхідний потік випромінювання розраховується з урахуванням взаємного розташування та впливу тіл одне на одне (взаємне опромінення, що надходить від інших границь моделі, опромінювання від зовнішніх джерел радіації, навколишнього випромінювання).

Граничні умови для рівняння (8)

$$\mathbf{u}_\Gamma = 0, \quad (10)$$

де  $\mathbf{u}_\Gamma$  – швидкість потоку на границі «тіло» – «повітря».



Рівняння (6-8) з граничними та початковими умовами (9-10) є математичною моделлю фізичного явища, що розглядається. Розв'язання системи (8-10) використовувалась програма Comsol Multiphysics.

**Результати розрахунків.** У відповідності до результатів, отриманих в [31], розрахунки проводились для матеріалу топки вставки, виготовленої з олов'яного дроту діаметром 13 мкм для струму 32 мА та діаметром 30 мкм для струму 80 мА [31]. Діаметри топки вставки визначались експериментально [31] та підбиралися шляхом розрахунку.

На рис. 9 показано поле швидкостей повітря всередині та ззовні запобіжника та розподіл температур в сталому номінальному режимі.

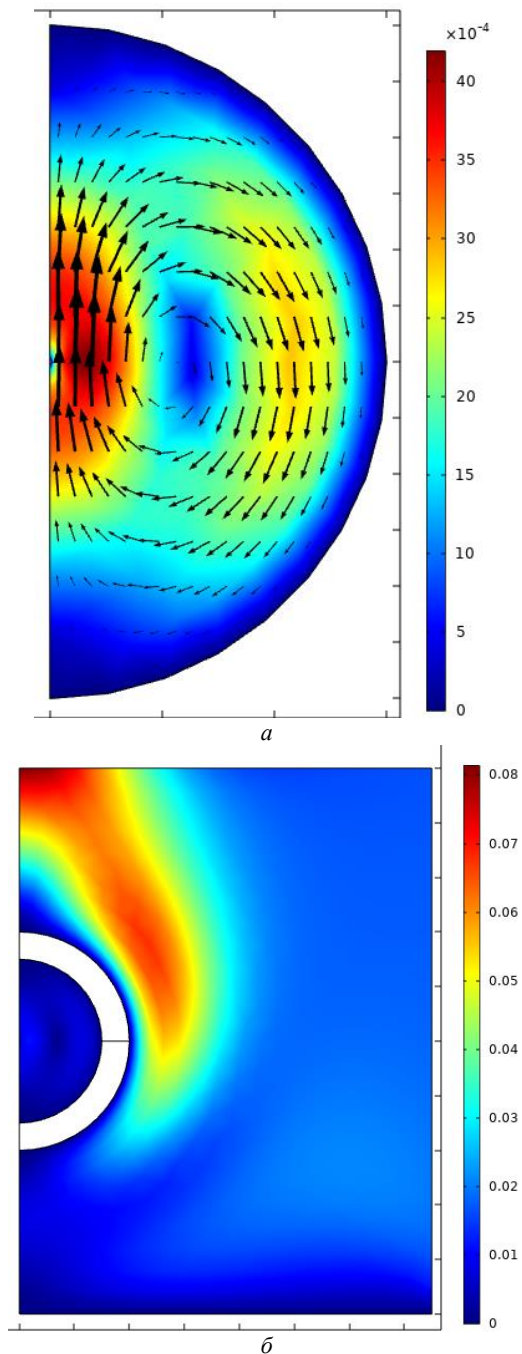


Рис. 9. Картина розподілу швидкостей потоків повітря в корпусі *a*) та на поверхні топтого запобіжника *б*) в м/с

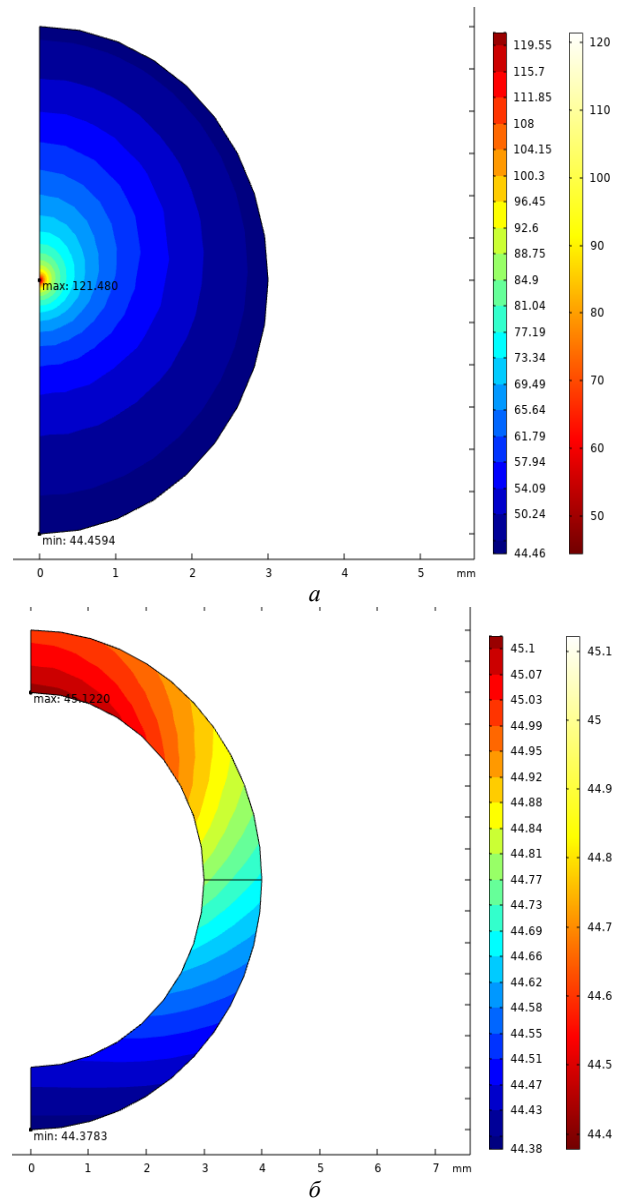
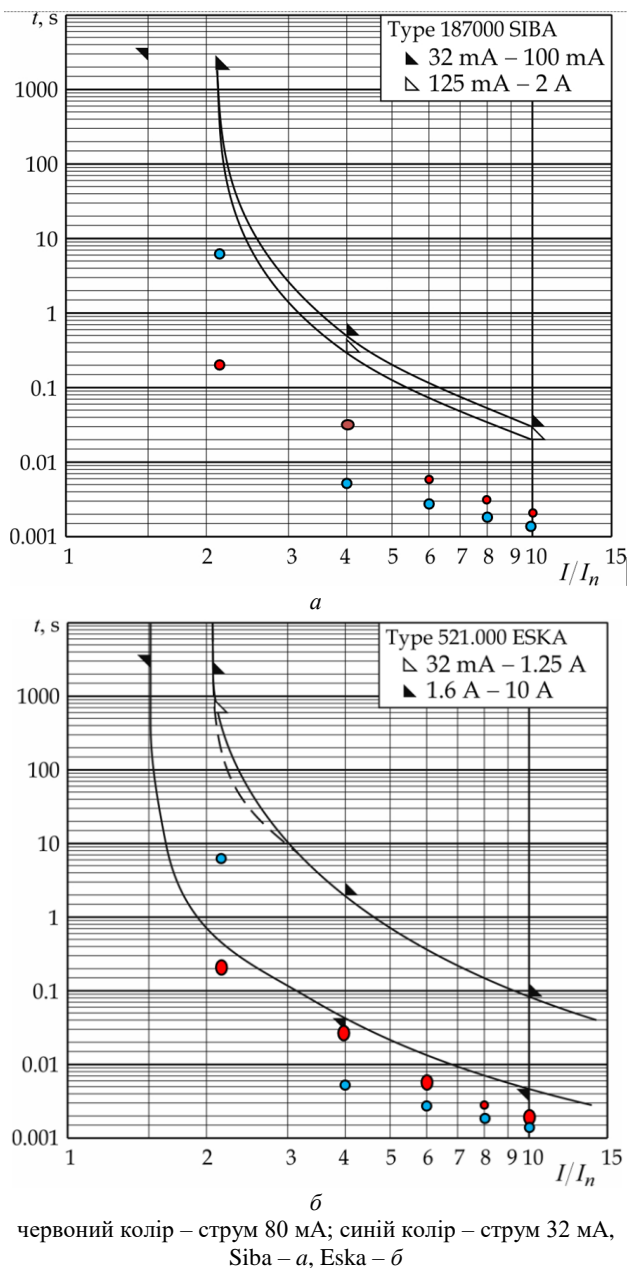


Рис. 10. Розподіл температур в запобіжнику в сталому режимі в середині *a*) і корпусі *б*) в  $^{\circ}\text{C}$

**Порівняння розрахункових та каталожних даних топлених запобіжників.** У якості експериментальної перевірки отриманих даних були використані каталожні дані часо-струмових характеристик базових запобіжників (Туре 187000 виробництва SIBA та VPO 38-T0080). На рис. 11 наведені порівняльні характеристики.



червоний колір – струм 80 мА; синій колір – струм 32 мА,  
Siba – а, Eska – б

Рис. 11. Порівняльні характеристики розрахункових та каталожних даних топких запобіжників на номінальний струм 32 мА та 80 мА

Відмінність отриманих характеристик можна пояснити тим, що в розрахунках не враховується час існування електричної дуги, який може бути при напрузі (6...35) кВ в декілька разів більше ніж час до появи електричної дуги який і був розрахований в моделі. Окрім цього в запобіжниках ВРО 38-Т0080 треба враховувати час, який іде на нагрів дугою олов'яної краплі, яка тримає струмопровідну пружину. Тобто, основною проблемою розробки потрібного запобіжника є технологічна проблема отримання топкої вставки потрібного діаметра.

**Висновки.** Показано, що в електричній мережі середньої напруги 6-35 кВ існує проблема захисту вимірювальних трансформаторів напруги. Це пов'язано з недостатньо ефективним рівнем захисту за допомогою топких запобіжників.

Виявлено, що розповсюджені випадки, коли захист вимірювальних трансформаторів середньої напруги з епоксидною ізоляцією забезпечується топками запобіжниками, у яких номінальним струмом топкої вставки є значно більшим за граничнодопустимий тривалий струм первинної обмотки вимірювального трансформатору.

Проведено порівняльний аналіз значень струму первинної обмотки вимірювальних трансформаторів середньої напруги зі значеннями номінальних струмів топких вставок запобіжників різних виробників, що представлені на ринку України.

Встановлено, що в Україні потреби у топких запобіжниках для захисту вимірювальних трансформаторів середньої напруги забезпечуються переважно поставками за кордону, тому перспективним напрямком подальшого розвитку у цьому напрямі є створення вітчизняної конкурентоспроможної конструкції топкого запобіжника та впровадження його у виробництво.

Розроблена математична модель та проведено порівняльний розрахунковий аналіз, який доводить можливість розробки топких запобіжників, які по своїм характеристикам не будуть поступаєтьс найкращим закордонним аналогам.

В перспективі планується провести експериментальні дослідження з урахуванням отриманих теоретичних результатів.

#### Список літератури

1. Tugai Y.I., Tugai I.Y. A combined method for study of ferroresonance processes in voltage transformer. *2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 2014, pp. 71-73. doi: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2014.6874205>.
2. Tugay Y.I., Ganus O.I., Starkov K.O. The switching in voltage transformer. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 5, pp. 73-75. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.073>.
3. Zhurahivskiy A.V., Kens Yu.A., Yatsenko A.Y., Masliak R.Y. Ferroresonance processes in electrical networks 10 kV with different voltage transformers. *Technical Electrodynamics*, 2010, no. 2, pp. 73-77. (Ukr). Available at: <http://previous.techned.org.ua/article/10-2/st9.pdf> (accessed 25 May 2021).
4. Ryzhkova Y.N., Tsyruk S.A. Ferroresonance suppression in distribution networks. *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2016, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911458>.
5. Jahagirdar A., Thosar A., Dhote V.P. Study of High Voltage Inductive Voltage Transformer for Transients and Ferroresonance. *2018 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS)*, 2018, pp. 174-180. doi: <https://doi.org/10.1109/ICPECTS.2018.8521570>.
6. Hanus O., Starkov K. Study of the nature of overvoltages in the electrical network arising from voltage transformers. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, 2021, no. 1 (2), pp. 28-36. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.01.05>.
7. Kaczmarek M., Brodecki D. Transformation of Transient Overvoltages by Inductive Voltage Transformers. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 12, p. 4167. doi: <https://doi.org/10.3390/s21124167>.
8. McDermitt D.C., Shipp D.D., Dionise T.J., Lorch V. Medium-Voltage Switching Transient-Induced Potential Transformer Failures: Prediction, Measurement, and Practical Solutions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2013, vol. 49, no. 4, pp. 1726-1737. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2258453>.
9. Dan M., Zanotto L., Gaio E., Panizza C., Finotti C., Perna M. Development and Validation of a Special Protection System for

- Internal Fault in a High-Power Three-Level NPC VSC. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 18, p. 5937. doi: <https://doi.org/10.3390/en14185937>.
10. Zhurahivskiyi A.V., Kens Y.A., Yatsyeko A.Y., Maslyak R.Y. Multi-protection system power grids 6-35 kV from ferroresonance processes. *Technical Electrodynamics*, 2013, no. 5, pp. 70-76. Available at: [http://previous.techned.org.ua/2013\\_5/st11.pdf](http://previous.techned.org.ua/2013_5/st11.pdf) (accessed 25 May 2021).
  11. Ganus A.I., Starkov K.A. Damaging voltage transformers in power grids regional AK "Kharkivoblenergo" and measures to reduce it. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 2003, no. 1, pp. 76-81. (Rus).
  12. Xue S., Sun W., Yang J., Gao F., Li Y., Li Z. Hidden failure identification and protection of multi-grounding fault in secondary circuit of potential transformer. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2016, vol. 11, no. 3, pp. 300-307. doi: <https://doi.org/10.1002/tee.22219>.
  13. Heidary A., Rouzbeh K., Radmanesh H., Pou J. Voltage Transformer Ferroresonance: An Inhibitor Device. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, vol. 35, no. 6, pp. 2731-2733. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.3005321>.
  14. Cazacu E., Ioniță V., Petrescu L. An efficient method for investigating the ferroresonance of single-phase iron core devices. *2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 2017, pp. 363-368. doi: <https://doi.org/10.1109/ATEE.2017.7905167>.
  15. Niu B., Wu X., Zhang G., Ma F., Tan D., He S. Analysis and Improvement Measures of Inductive Voltage Transformer Fault Caused by Intermittent Grounding. *Gaoya Dianqi / High Voltage Apparatus*, 2020, vol. 56, no. 10, pp. 70-74 and 83. doi: <https://doi.org/10.13296/j.1001-1609.hva.2020.10.012>.
  16. Kaczmarek M. Secondary current distortion of inductive current transformer in conditions of dips and interruptions of voltage in the power line. *Electric Power Systems Research*, 2016, vol. 137, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.03.043>.
  17. Popov M. General approach for accurate resonance analysis in transformer windings. *Electric Power Systems Research*, 2018, vol. 161, pp. 45-51. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.04.002>.
  18. Lesniewska E., Kaczmarek M., Stano E. 3D Electromagnetic Field Analysis Applied to Evaluate the Accuracy of a Voltage Transformer under Distorted Voltage. *Energies*, 2020, vol. 14, no. 1, p. 136. doi: <https://doi.org/10.3390/en14010136>.
  19. Эткінд Л. Защита трансформаторов напряжения в сетях 3-35 кВ. Необходимо изменить режим заземления нейтралей. *Новости электротехники*, 2003, №5 (23). Электронный ресурс: <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/23/06.php>.
  20. Hejian W., Hongtao L., Tao G., Jun J., Hailong Z., Song J. Research and Application of 10 kV Built-in High Voltage Protection Distribution Transformer. *2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 2018, pp. 280-284. doi: <https://doi.org/10.1109/CICED.2018.8592468>.
  21. Ventruella D.J. Transformer Fuse Sizing – The NEC is not the Last Word. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, vol. 55, no. 2, pp. 2173-2180. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2880145>.
  22. Liang Z., Zhao M., Niu S., Liu H., Liang S., Guo Y. Defects of measures against PT fuse melting in distribution network and research of new measure. *Dianli Zidonghua Shebei/Electric Power Automation Equipment*, 2016, vol. 36, no. 9, pp. 17-24 and 32. doi: <https://doi.org/10.16081/j.issn.1006-6047.2016.09.003>.
  23. Wang K., Liu H., Yang Q., Yin L., Huang J. Impact Transient Characteristics and Selection Method of Voltage Transformer Fuse. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 4, p. 737. doi: <https://doi.org/10.3390/en12040737>.
  24. Pleșca A., Dumitrescu C., Zhang G., Han D. Overcurrent protection using a new type of electric fuse. *2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, 2016, pp. 143-146. doi: <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2016.7781321>.
  25. Kim S. et al. Modeling and Verification of a High Voltage Fuse for High Reliability and Safety in Electric Vehicle. *2020 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal / Power Integrity (EMCSI)*, 2020, pp. 287-292. doi: <https://doi.org/10.1109/EMCSI38923.2020.9191482>.
  26. Ventruella D.-J. Transformer Fuses – Mind the Gap. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, vol. 56, no. 5, pp. 5670-5677. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2993523>.
  27. ДСТУ EN 60269-1:2017 Запобіжники плавкі низьковольтні. Частина 1. Загальні технічні вимоги (EN 60269-1:2007; A1:2009; A2:2014, IDT; ІЕС 60269-1:2006 + AMD1:2009 + AMD2:2014, IDT).
  28. ІЕС 60269-1:2006+AMD1:2009+AMD2:2014 CSV Consolidated version. Low-voltage fuses – Part 1: General requirements. – 345 p.
  29. ДСТУ EN 60282-1:2016 Запобіжники плавкі високовольтні. Частина 1. Струмообмежувальні плавкі запобіжники (EN 60282-1:2009, IDT). Зі зміною № 1:2016.
  30. ІЕС 60282-1:2020 High-voltage fuses – Part 1: Current-limiting fuses. – 167 p.
  31. Bajda, Y., Grechko, O., Buhachuk, V., & Knápek, R. To the problem of protection of medium voltage instrument transformers with fuses: Analytical research. *Lighting Engineering & Power Engineering* 2021, Vol. 60, No. 3, 124–132. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2021.60.3.05>.
  32. Трансформаторы напряжения ЗНОЛП. Руководство по эксплуатации ИГ.671 241.000 РЭ. Интернет ресурс <https://www.tdtransformator.ru/transformatory-izmeritelnye/transformatory-napryazheniya/znolp-10-transformatory-napryazheniya-zazemlyayemye-s-predohranitelem/>
  33. Heat Transfer Module. Comsol documentation. Интернет ресурс. <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.heat/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf>.
  34. Предохранитель Siba 186000 8×120мм 6кВ, 187000 8×150мм 10кВ, 500МА, 630МА GZHV высоковольтный миниатюрный. <https://resursenergospab.ru/vysokovoltnoe-oborudovanie/predohranitel-siba/>

## References (transliterated)

1. Tugai Y.I., Tugai I.Y. A combined method for study of ferroresonance processes in voltage transformer. *2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 2014, pp. 71-73. doi: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2014.6874205>.
2. Tugay Y.I., Ganus O.I., Starkov K.O. The switching in voltage transformer. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 5, pp. 73-75. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.073>.
3. Zhurahivskiyi A.V., Kens Yu.A., Yatsyeko A.Y., Maslyak R.Y. Ferroresonance processes in electrical networks 10 kV with different voltage transformers. *Technical Electrodynamics*, 2010, no. 2, pp. 73-77. (Ukr). Available at: <http://previous.techned.org.ua/article/10-2/st9.pdf> (accessed 25 May 2021).
4. Ryzhkova Y.N., Tsyruk S.A. Ferroresonance suppression in distribution networks. *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2016, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911458>.
5. Jahagirdar A., Thosar A., Dhote V.P. Study of High Voltage Inductive Voltage Transformer for Transients and Ferroresonance. *2018 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS)*, 2018, pp. 174-180. doi: <https://doi.org/10.1109/ICPECTS.2018.8521570>.
6. Hanus O., Starkov K. Study of the nature of overvoltages in the electrical network arising from voltage transformers. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, 2021, no. 1 (2), pp. 28-36. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.01.05>.
7. Kaczmarek M., Brodecki D. Transformation of Transient Overvoltages by Inductive Voltage Transformers. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 12, p. 4167. doi: <https://doi.org/10.3390/s21124167>.
8. McDermit D.C., Shipp D.D., Dionise T.J., Lorch V. Medium-Voltage Switching Transient-Induced Potential Transformer Failures: Prediction, Measurement, and Practical Solutions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2013, vol. 49, no. 4, pp. 1726-1737. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2258453>.
9. Dan M., Zanotto L., Gaio E., Panizza C., Finotti C., Perna M. Development and Validation of a Special Protection System for Internal Fault in a High-Power Three-Level NPC VSC. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 18, p. 5937. doi: <https://doi.org/10.3390/en14185937>.
10. Zhurahivskiyi A.V., Kens Y.A., Yatsyeko A.Y., Maslyak R.Y. Multi-protection system power grids 6-35 kV from ferroresonance processes. *Technical Electrodynamics*, 2013, no. 5, pp. 70-76. Available at: [http://previous.techned.org.ua/2013\\_5/st11.pdf](http://previous.techned.org.ua/2013_5/st11.pdf) (accessed

- 25 May 2021).
11. Ganus A.I., Starkov K.A. Damaging voltage transformers in power grids regional AK "Kharkivoblenergo" and measures to reduce it. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 2003, no. 1, pp. 76-81. (Rus).
  12. Xue S., Sun W., Yang J., Gao F., Li Y., Li Z. Hidden failure identification and protection of multi-grounding fault in secondary circuit of potential transformer. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2016, vol. 11, no. 3, pp. 300-307. doi: <https://doi.org/10.1002/tee.22219>.
  13. Heidary A., Rouzbehi K., Radmanesh H., Pou J. Voltage Transformer Ferroresonance: An Inhibitor Device. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, vol. 35, no. 6, pp. 2731-2733. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.3005321>.
  14. Cazacu E., Ioniță V., Petrescu L. An efficient method for investigating the ferroresonance of single-phase iron core devices. *2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 2017, pp. 363-368. doi: <https://doi.org/10.1109/ATEE.2017.7905167>.
  15. Niu B., Wu X., Zhang G., Ma F., Tan D., He S. Analysis and Improvement Measures of Inductive Voltage Transformer Fault Caused by Intermittent Grounding. *Gaoya Dianqi/High Voltage Apparatus*, 2020, vol. 56, no. 10, pp. 70-74 and 83. doi: <https://doi.org/10.13296/j.1001-1609.hva.2020.10.012>.
  16. Kaczmarek M. Secondary current distortion of inductive current transformer in conditions of dips and interruptions of voltage in the power line. *Electric Power Systems Research*, 2016, vol. 137, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.03.043>.
  17. Popov M. General approach for accurate resonance analysis in transformer windings. *Electric Power Systems Research*, 2018, vol. 161, pp. 45-51. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.04.002>.
  18. Lesniewska E., Kaczmarek M., Stano E. 3D Electromagnetic Field Analysis Applied to Evaluate the Accuracy of a Voltage Transformer under Distorted Voltage. *Energies*, 2020, vol. 14, no. 1, p. 136. doi: <https://doi.org/10.3390/en14010136>.
  19. Etkind L. Zashita transformatorov napryazheniya v setyah 3-35 kV. Neobhodimo izmenit rezhim zazemleniya nejtrali. *Novosti elektrotehniki*, 2003, no 5 (23). Elektronij resurs: <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/23/06.php>.
  20. Hejian W., Hongtao L., Tao G., Jun J., Hailong Z., Song J. Research and Application of 10 kV Built-in High Voltage Protection Distribution Transformer. *2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 2018, pp. 280-284. doi: <https://doi.org/10.1109/CICED.2018.8592468>.
  21. Ventruella D.J. Transformer Fuse Sizing – The NEC is not the Last Word. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, vol. 55, no. 2, pp. 2173-2180. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2880145>.
  22. Liang Z., Zhao M., Niu S., Liu H., Liang S., Guo Y. Defects of measures against PT fuse melting in distribution network and research of new measure. *Dianli Zidonghua Shebei / Electric Power Automation Equipment*, 2016, vol. 36, no. 9, pp. 17-24 and 32. doi: <https://doi.org/10.16081/j.issn.1006-6047.2016.09.003>.
  23. Wang K., Liu H., Yang Q., Yin L., Huang J. Impact Transient Characteristics and Selection Method of Voltage Transformer Fuse. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 4, p. 737. doi: <https://doi.org/10.3390/en12040737>.
  24. Pleșca A., Dumitrescu C., Zhang G., Han D. Overcurrent protection using a new type of electric fuse. *2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, 2016, pp. 143-146. doi: <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2016.7781321>.
  25. Kim S. et al. Modeling and Verification of a High Voltage Fuse for High Reliability and Safety in Electric Vehicle. *2020 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal / Power Integrity (EMCSI)*, 2020, pp. 287-292. doi: <https://doi.org/10.1109/EMCSI38923.2020.9191482>.
  26. Ventruella D.-J. Transformer Fuses – Mind the Gap. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, vol. 56, no. 5, pp. 5670-5677. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2993523>.
  27. DSTU EN 60269-1:2017 Zapobizhnyky plavki nyz'kovol'tni. Chastyna 1. Zahal'ni tekhnichni vymohy (EN 60269-1:2007; A1:2009; A2:2014, IDT; IEC 60269-1:2006 + AMD1:2009 + AMD2:2014, IDT).
  28. IEC 60269-1:2006+AMD1:2009+AMD2:2014 CSV Consolidated version. Low-voltage fuses – Part 1: General requirements. – 345 p.
  29. DSTU EN 60282-1:2016 Zapobizhnyky plavki vysokovol'tni. Chastyna 1. Strumooobmezhuvai'ni plavki zapobizhnyky (EN 60282-1:2009, IDT). Zi zminoyu No 1:2016.
  30. IEC 60282-1:2020 High-voltage fuses – Part 1: Current-limiting fuses. – 167 p.
  31. Bajda, Y., Grechko, O., Buhachuk, V., & Knápek, R. To the problem of protection of medium voltage instrument transformers with fuses: Analytical research. *Lighting Engineering & Power Engineering* 2021, Vol. 60, No. 3, 124–132. doi: <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2021.60.3.05>.
  32. Transformatory napryazheniya ZNOLP. Rukovodstvo po ekspluatacii 1GG.671 241.000 RE. Internet resurs <https://www.tdtransformator.ru/transformatory-izmeritelnye/transformatory-napryazheniya/znolp-10-transformatory-napryazheniya-zazemlyaemye-s-predohranitelem/>
  33. Heat Transfer Module. Comsol documentation. Internet resurs. <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.heat/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf>.
  34. Predohranitel Siba 186000 8×120 mm 6 kV, 187000 8×150 mm 10 kV, 500 mA, 630 mA GZHV vysokovol'tnyj miniatyurnyj. <https://resursenergossnab.ru/vysokovol'tnoe-oborudovanie/predohranitel-siba/>

Надійшло (received) 20.02.2023

*Відомості про авторів / About the authors*

**Байда Євген Іванович (Bajda Yevgen Ivanovych)** – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0297-328X>; e-mail: [yevhen.baida@khp.edu.ua](mailto:yevhen.baida@khp.edu.ua).

**Грецько Олександр Михайлович (Grechko Oleksandr Myhaylovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7872-8585>; e-mail: [a.m.grechko@gmail.com](mailto:a.m.grechko@gmail.com).