

ГРЕЧКО ОЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ ✉ – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Електричні апарати», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7872-8585>; e-mail: a.m.grechko@gmail.com.

ПРИЧИНИ ВИХОДУ З ЛАДУ ТОПКИХ ЗАПОБІЖНИКІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ З ЛИТОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

У статті розглянута проблема частих виходів з ладу топких запобіжників, що застосовуються для захисту вимірювальних трансформаторів, що заземлюються, середньої з літою ізоляцією, а також самих вимірювальних трансформаторів напруги, яка спостерігається як при протіканні аварійних режимів у мережах 6–35 кВ з ізолюваною нейтраллю, але й при виникненні однофазних замикань на землю, які не є аварійними. Виконано дослідження щодо встановлення причин виходу з ладу топких запобіжників для захисту вимірювальних трансформаторів напруги. Проведено дослідження вольт-амперної характеристики трьох вимірювальних трансформаторів напруги різних виробників. Встановлено розбіжності у значеннях струму холостого ходу при перенапругах у разі виникнення однофазних замикань на землю. Показано, що у вимірювальних трансформаторах напруги певних виробників магнітна індукція в магнітопроводі при номінальній напрузі може значно перевищувати значення 0,95 Тл. В цьому випадку магнітопровід трансформатора в режимі перенапруги, яка згідно стандарту може тривати 8 годин, входить в режим насичення, і в первинній обмотці трансформатора з'являється значний струм, що може у десятки разів перевищувати номінальне значення. Це може призвести до спрацювання запобіжника в колі первинної обмотки трансформатора, а при його відсутності призведе до перегріву трансформатора з ймовірним виходом його з ладу. Запропоновано рекомендації щодо ймовірних шляхів вирішення наявної проблеми, застосування яких на практиці з високою ймовірністю дозволить вирішити проблему частих виходів з ладу топких запобіжників у режимі однофазних замикань на землю, а також може суттєво знизити пошкоджувальність вимірювальних трансформаторів напруги з літою ізоляцією, що заземлюються, в електричних мережах середньої напруги 6–35 кВ з ізолюваною нейтраллю.

Ключові слова: топкий запобіжник; вимірювальний трансформатор напруги; літа ізоляція; середня напруга; однофазне замикання на землю; перенапруга; струм холостого ходу трансформатора напруги; магнітопровід трансформатора напруги; індукція насичення.

Вступ. Відомо, що для захисту вимірювальних трансформаторів (ТН) середньої напруги 6–35 кВ як з масляною, так і з літою ізоляціями застосовуються топкі запобіжники [1, 2]. Вони встановлюються зі сторони первинних обмоток високої напруги А–Х (рис. 1) окремо на ізоляційних опорних ізоляторах у розподільному пристрої (РП) або ж безпосередньо вбудовуються у конструкцію ТН. Такі запобіжники призначені для захисту ТН у випадку виникнення аварійних режимів, наприклад, коротке замикання на вторинних виводах. На практиці для захисту ТН інші захисні апарати не застосовуються.

Останні роки саме запобіжники, що вбудовуються в ТН з літою ізоляцією, які прийшли на зміну традиційним запобіжникам ПКН (рис. 2), набувають все більшої популярності. Основна перевага у застосуванні такого рішення полягає у тому, що запобіжники знаходяться в корпусі ТН і не потребують додаткового місця для розміщення в РП, що значно економить місце для інших електричних апаратів і обладнання, та суттєво зменшує габаритні розміри самого РП.

Одночасно з цим, існує проблема виходу з ладу як вбудованих запобіжників, так і самих ТН, яка спостерігається не тільки при протіканні аварійних режимів у мережах 6–35 кВ з ізолюваною нейтраллю, але й при виникненні однофазних замикань на землю (ОЗЗ), які за зазначеного режиму нейтралі не є аварійними і не вимагають негайного знеструмлення споживачів [3, 4]. Відповідно до діючого стандарту [5] для ТН, що заземлюються, номінальний коефіцієнт напруги (це коефіцієнт, на який потрібно помножити значення номінальної первинної напруги задля визначення максимальної напруги, за якої ТН повинен

відповідати вимогам щодо нагрівання протягом встановленого часу та класу точності) становить значення 1,9. Отже конструкція ТН разом із вбудованими запобіжниками повинні витримувати такі перевантаження, наприклад, при ОЗЗ протягом вказаних у [5] 8 годин. Як показує практичний досвід експлуатації, доволі частими є випадки пошкодження запобіжників та ТН при зазначених перенапругах та тривалому часі їх протікання.

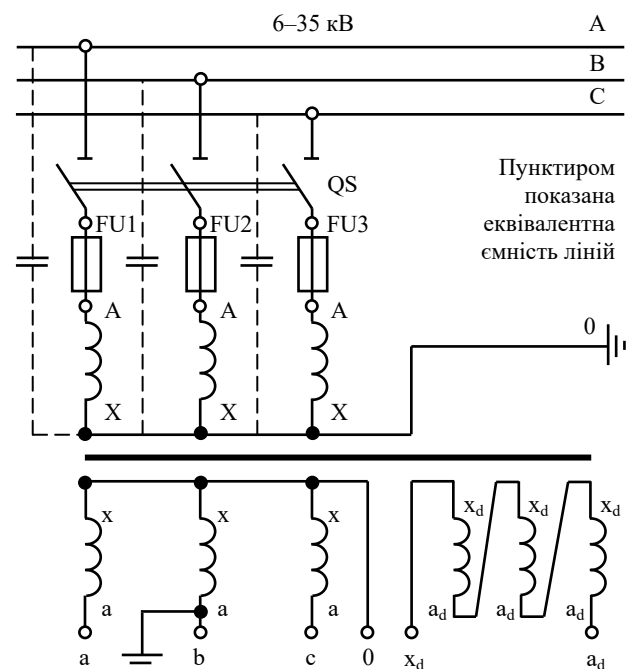


Рисунок 1 – Типова схема включення трифазної групи ТН, що складається з трьох окремих однофазних ТН

© О. М. Гречко, 2025



Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)
Конфлікт інтересів: Автор заявив про відсутність конфлікту

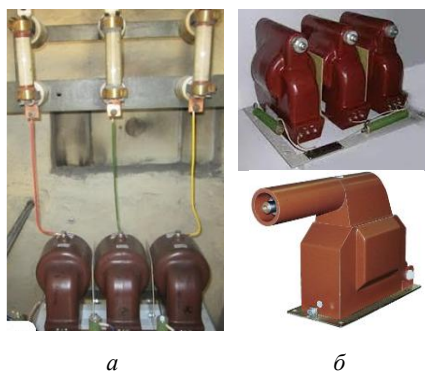


Рисунок 2 – Приклади теплових запобіжників для захисту ТН:
а – запобіжники типу ПКН;
б – запобіжники, що вбудовані у корпус ТН

Метою статті є дослідження причин виходу з ладу теплових запобіжників для захисту вимірювальних трансформаторів середньої напруги 6–35 кВ з литою ізоляцією.

Постановка проблеми. Як показано в попередніх роботах [2, 4, 6], однією з причин зростання кількості пошкоджень ТН з литою ізоляцією [7–11] є розповсюджена практика застосування запобіжників, в яких номінальний струм топкової вставки є значно більшим за гранично допустимий тривалий струм первинної обмотки ТН.

Або за якоюсь сталою традицією, що склалась історично для захисту запобіжниками ТН із масляною ізоляцією, або ж з причин недостатнього розуміння процесів, що протікають у ТН вже із литою ізоляцією, багато експлуатаційних енергокомпаній продовжують обирати номінальний струм запобіжника, призначеного для захисту ТН з литою ізоляцією на середній клас напруги 6–35 кВ з діапазону значень в інтервалі 0,3–0,63 А. Оскільки попит народжує пропозицію, то цьому певним чином «підіграють» і самі виробники запобіжників для захисту ТН, наприклад [12], які пропонують свої вироби, що допускають тривале протікання струму навантаження до 0,5 А, не нормуючи при цьому значень номінального струму запобіжника (rated current I_n), номінального найбільшого струму відмикання (rated maximum breaking current I_1) та номінального найменшого струму відмикання (rated minimum breaking current I_3), а вказуючи лише номінальну напругу і найбільшу робочу напругу запобіжника.

При цьому номінальне значення струму в колі первинної обмотки ТН (прим. – далі в роботі розглядаються ТН, що заземлюється, з литою ізоляцією, тому для скорочення будемо використовувати тільки абревіатуру ТН), залежно від класу напруги і номінальної потужності вторинних обмоток, знаходиться в інтервалі всього лише приблизно 3–30 мА. Так, наприклад, при роботі ТН номінальною напругою 6 кВ на максимальній потужності 630 ВА, яка відповідає режиму роботи ТН поза встановленого класу точності, струм в колі первинної обмотки ТН може досягати значень в інтервалі 0,1–0,2 А, що в будь-якому випадку є нижчим

за вказані вище номінальні струми запобіжників, що використовуються.

Виникає питання – у чому полягає причина доволі частих перегорань запобіжників, якщо навіть їх номінальний струм є в декілька разів більшим за струм в колі первинної обмотки ТН? Причина може полягати як власне в самих запобіжниках, так і в ТН та їх особливостях роботи. Стосовно запобіжників, то як вже було відмічено [2, 4], існує проблема неузгодженості значень номінального струму топкової вставки запобіжника для захисту ТН і гранично допустимого тривалого струму первинної обмотки ТН. Стосовно ТН, то для кращого розуміння існуючої проблеми, треба проаналізувати процеси, що відбуваються в ТН у різних режимах роботи.

Аналіз роботи ТН. Зазвичай ТН складається з:

- 1) магнітопроводу, що являє собою нелінійний елемент, виконаний з електротехнічної сталі зі значенням індукції насичення $B_s \approx 1,7\text{--}1,8$ Тл;
- 2) первинної обмотки, один із терміналів якої Х (див. рис. 1) у процесі роботи має бути заземлений;
- 3) однієї (або двох) основних вторинних обмоток (а – х на рис. 1), що призначені для підключення приладів обліку електроенергії, контролю та, за необхідності, живлення власних потреб у межах встановленої номінальної потужності;
- 4) додаткової обмотки (a_d – x_d на рис. 1), яка у складі трифазної групи ТН (наприклад, три однофазні ТН типу ЗНОЛ, рис. 3) збирається за схемою розімкнутого трикутника та призначена виключно для контролю ізоляції мережі і не передбачає наявності підключення будь-якого додаткового навантаження. Дана обмотка також може бути відсутня, якщо ТН не призначений для виконання функції контролю ізоляції мережі (в цьому випадку зазвичай використовують ТН, що не заземлюються, наприклад, типу НОЛ).

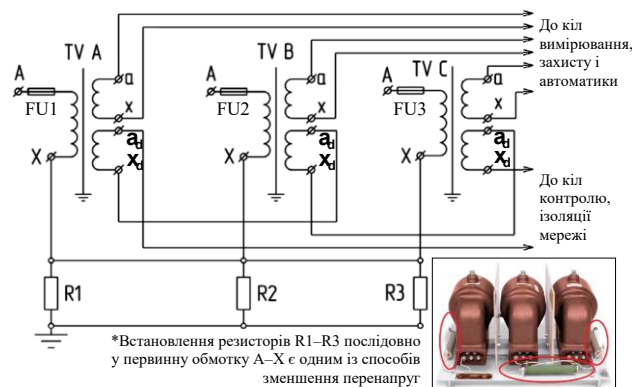


Рисунок 3 – Схема трифазної групи ТН 3×ЗНОЛ, зібраної із трьох ТН з однією основною вторинною обмоткою

Як відомо, індуктивний ТН (на середній клас напруги 6–35 кВ використовуються саме індуктивні ТН, а ємнісні ТН зазвичай застосовуються вже на більш високий клас напруги – 110 кВ і вище) є нелінійним елементом зі своєю характеристикою намагнічування – залежністю магнітної індукції B від напруженості поля H .

У нормальному симетричному режимі роботи мережі кожен з трьох однофазних ТН, зібраних в трифазну групу, працює на фазній напрузі U_n , а в момент виникнення ОЗЗ в одній з фаз мережі, на двох інших «здорових» фазах з'являється лінійна напруга, що дорівнює $\sqrt{3}U_n$.

Як зазначалось вище, згідно з [5] номінальний коефіцієнт напруги (англ. *rated voltage factor*) для ТН, що заземлюються, та працюють в мережах із ізольованою нейтраллю, складає 1,9. Хоча при наявності в симетричній мережі найбільшої робочої напруги, яка згідно з [13] для класу напруги 6–10 кВ становить $1,2 \cdot U_n$, реальне значення напруги при виникненні ОЗЗ може скласти не $1,9 \cdot U_n$, а більше – $1,2 \cdot \sqrt{3}U_n \approx 2,08 \cdot U_n$.

Таким чином, ТН мають бути спроектовані і виготовлені у відповідності до наведених значень, щоб у момент виникнення перенапруги магнітопровід ТН не увійшов в режим насичення і в його первинній обмотці не з'явився великий струм.

Якщо взяти за індукцію насичення матеріалу магнітопроводу максимальне значення $B_s = 1,8$ Тл (при ймовірній перенапрузі $1,9 \cdot U_n$), то при номінальній напрузі U_n значення магнітної індукції не має перевищувати $1,8 / 1,9 \approx 0,95$ Тл, (зазвичай це значення береться на рівні 0,9 Тл). Виходячи з цих значень і повинен проводитися розрахунок перерізу магнітопроводу та кількості витків в обмотках ТН.

Насправді, як показав багаторічний досвід експлуатації ТН, на практиці існують ТН зі значенням магнітної індукції, яка перевищує значення 0,95 Тл при номінальній напрузі U_n . В результаті цього магнітопровід ТН в режимі ймовірної перенапруги $1,9 \cdot U_n$, яка може тривати 8 годин [5], входить в режим насичення, і в первинній обмотці ТН з'являється значний струм, що може у десятки разів перевищувати номінальне значення. При наявності запобіжника в колі первинної обмотки ТН це може призвести до його спрацювання, або ж, при його відсутності, призведе до перегріву ТН з наступним виходом його з ладу.

Це відбувається з кількох причин.

1) *Помилки виробників при проектуванні ТН.* У намаганні виготовлення ТН з більшими значеннями потужності навантаження на основних вторинних обмотках а – х при одночасному збереженні високого класу точності деякі виробники ТН знижують опір обмоток постійному струму за рахунок зниження кількості витків, тим самим свідомо збільшуючи значення робочої магнітної індукції ТН.

2) *Намагання щодо зменшення собівартості ТН.* З метою економії активних матеріалів деякі виробники проводять проектування ТН на гранично допустимих значеннях магнітної індукції, максимально при цьому заощаджуючи на перерізі магнітопроводу та кількості міді в обмотках, часто без урахування таких технологічних факторів, як: недосконалість технології складання магнітопроводу; використання електротехнічної сталі низької якості із точно не встановленими магнітними характеристиками;

використання у роботі невідпалених магнітопроводів тощо.

3) *Погіршення магнітних характеристик магнітопроводу внаслідок механічного впливу епоксидної смоли.* Епоксидна смола сама по собі не є магнітним матеріалом і напругу впливати на магнітні властивості не може. Однак опосередковано вона може помітно відбиватись на магнітних характеристиках магнітопроводу ТН через механічні, теплові та діелектричні ефекти. Основний вплив епоксидної смоли полягає у створенні проміжків між листами магнітопроводу. При нещільному пакетуванні під час заливання смола проникає між сталевими пластинами, створюючи немагнітні прошарки, що збільшує сумарний магнітний проміжок. Це призводить до зменшення магнітної проникності μ , а також до зниження індуктивності L первинної обмотки, і, як результат – до збільшення струму намагнічування I_m . Епоксидна смола також чинить дію на магнітні втрати. Через наявність мікропроміжків збільшується потік розсіювання, зростають вихрові струми в магнітопроводі, і, як результат – втрати в магнітопроводі збільшуються. Епоксидна смола впливає на теплові втрати. Оскільки епоксидна смола має низьку теплопровідність на рівні $\lambda \approx 0,2\text{--}0,3$ Вт/(м·К) (для порівняння у електротехнічній сталі $\lambda \approx 20\text{--}30$ Вт/(м·К)), то при збільшенні температури нагріву магнітопроводу ТН від зростання вихрових струмів тепло від нього гірше відводиться назовні, температура осердя зростає і магнітна проникність зменшується. Варто відзначити ще одну не очевидну на перший погляд залежність. Як відомо, епоксидна смола фіксує осердя і обмотки ТН, але при застиганні спостерігається усадка смоли на рівні 1–2 % від її об'єму. Це створює внутрішні механічні напруження і деформації в сталі, що також зменшує магнітну проникність. Як результат – сталь більш швидко входить в режим насичення. Але, не дивлячись на перелічені проблеми і недоліки, при дотриманні високих рівнів технологічних процесів на виробництві застосування епоксидної смоли має ряд переваг, серед яких варто відзначити такі: підвищення електричної міцності, покращення захисту від проникнення всередину вологи, створення монолітної конструкції із фіксацією і стабілізацією геометричних проміжків, зниження вібрації і шуму пластин магнітопроводу. Отже, як висновок, можна сказати, що епоксидна смола при певних обставинах може погіршувати магнітні характеристики магнітопроводу ТН, але одночасно підвищує надійність та ізоляційну стійкість ТН.

4) *Недоліки стандартів.* У діючому стандарті [5] відсутні вимоги щодо перевірки ТН в режимі ОЗЗ при проведенні приймальних випробувань. В результаті ТН встановлюються на об'єкти без перевірки їх стійкості до режиму ОЗЗ, і тут вже присутній фактор випадковості у разі виникнення цієї аварії.

Дослідження ТН. При випуску ТН з виробництва (або знаючи їх конструктивні параметри), можна контролювати індукцію за допомогою зняття вольт-

амперної характеристики (ВАХ) із наступним перерахуванням за такими формулами:

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot S_m \cdot B; \Rightarrow B = \frac{E_2}{4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot S_m} \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{H \cdot L}{w_2}; \Rightarrow H = \frac{I_2 \cdot w_2}{L}, \quad (2)$$

де E_2 – електрорушійна сила (ЕРС) вторинної обмотки, В;

f – частота мережі, Гц;

w_2 – кількість витків вторинної обмотки;

S_m – активний переріз магнітопроводу, м²;

B – магнітна індукція, Тл;

I_2 – діюче значення струму у вторинній обмотці, А;

H – напруженість магнітного поля, А/м;

L – середня довжина магнітопроводу, м.

Під час експлуатації ТН можна знімати його ВАХ та проводити таким чином аналітичний (або порівняльний) аналіз роботи конкретного ТН в режимі ОЗЗ. На рис. 4 наведені приклади ВАХ, що були зняті з основних вторинних обмоток а – х (номінальна напруга $100 / \sqrt{3} \approx 57,7$ В) трьох ТН, що знаходились в експлуатації в мережі з ізольованою нейтраллю напругою 10 кВ. Оскільки всі три ТН були з литою ізоляцією і знаходились в експлуатації, то достеменно їх конструктивні параметри (переріз магнітопроводу, його середня довжина, кількість витків в обмотках) були невідомі. Проаналізуємо отримані залежності.

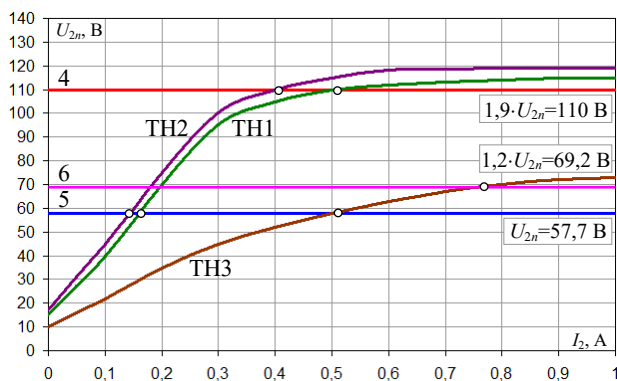


Рисунок 4 – ВАХ досліджуваних ТН

Крива 1 (зелений колір) відповідає **ТН1**, що заземлюється, з литою ізоляцією одного з європейських виробників з номінальною напругою первинної обмотки $U_{1n} = 10000/\sqrt{3}$ В, та двома вторинними обмотками: однією основною (з номінальною напругою $U_{2n} = 100/\sqrt{3}$ В, потужністю $P_{2n} = 75$ ВА та класом точності 0,5) та однією додатковою ($U_{2nd} = 100/3$ В, $P_{2nd} = 50$ ВА, клас точності 3).

При номінальній напрузі $U_{2n} = 57,7$ В (пряма 5 блакитного кольору на рис. 4) струм холостого ходу склав $I_{xx} \approx 0,15$ А. При напрузі $1,9 \cdot U_{2n} \approx 110$ В (пряма 4 червоного кольору на рис. 4) струм холостого ходу склав $I_{xx} \approx 0,52$ А. Надалі із збільшенням перенапруги

(з урахуванням коефіцієнту 1,2, що відповідає найбільшій робочій напрузі) вище за значення $2,08 \cdot U_{2n} \approx 120$ В спостерігається різке наростання струму. Можна заключити, що даний ТН1 спроектовано та виготовлено доволі якісно, але при перенапругах, більших за кратність $1,9 \cdot U_{2n}$, магнітопровід ТН1 буде входити в насичення, струм буде різко збільшуватись, що при неналежному захисті ТН призведе до його виходу з ладу.

Крива 2 (пурпуровий колір) відповідає **ТН2** одного з закордонних виробників з номінальною напругою первинної обмотки $U_{1n} = 10000/\sqrt{3}$ В, та двома вторинними обмотками: однією основною ($U_{2n} = 100/\sqrt{3}$ В, $P_{2n} = 75$ ВА, клас точності 0,5) та однією додатковою ($U_{2nd} = 100/3$ В, $P_{2nd} = 200$ ВА, клас точності 3).

При номінальній напрузі $U_{2n} = 57,7$ В струм холостого ходу ТН2 склав $I_{xx} \approx 0,14$ А. При напрузі $1,9 \cdot U_{2n} \approx 110$ В струм холостого ходу склав $I_{xx} \approx 0,41$ А. Надалі при збільшенні напруги ТН2 продовжував працювати і при напрузі $2,08 \cdot U_{2n} \approx 120$ В струм холостого ходу склав більше 2 А із подальшим різким зростанням. Можна підсумувати, що даний ТН2 спроектовано також якісно, магнітопровід має певний запас щодо індукції насичення, і ТН2 буде працювати до перенапруг кратних $2,08 \cdot U_{2n}$.

Крива 3 (коричневий колір) відповідає **ТН3** виробництва країни-агресора з номінальною напругою первинної обмотки $U_{1n} = 10000/\sqrt{3}$ В, та трьома вторинними обмотками: першою основною ($U_{2n} = 100/\sqrt{3}$ В, $P_{2n} = 10$ ВА, клас точності 0,2), другою основною ($U_{2n} = 100/\sqrt{3}$ В, $P_{2n} = 75$ ВА, клас точності 0,5), та однією додатковою ($U_{2nd} = 100/3$ В, $P_{2nd} = 200$ ВА, клас точності 3).

Як бачимо з рис. 4 ВАХ ТН3 суттєво відрізняється від ВАХ ТН1 та ТН2.

При номінальній напрузі $U_{2n} = 57,7$ В струм холостого ходу ТН3 склав $I_{xx} \approx 0,52$ А, що більш ніж в 3 рази перевищує аналогічні значення для ТН1 та ТН2. Очевидно, що ТН3 ані при напрузі $1,9 \cdot U_{2n}$, ані тим більше при $2,08 \cdot U_{2n}$ працювати не буде. Навіть при напрузі $1,2 \cdot U_{2n} \approx 69,2$ В (пряма 6 рожевого кольору на рис. 4), що відповідає найбільшій робочій напрузі, струм холостого ходу склав $I_{xx} \approx 0,78$ А із подальшим різким зростанням.

Можна підсумувати, що ТН3 спроектовано з реальним коефіцієнтом напруги на рівні 1,2 (хоча за [5] має бути 1,9, про що вказано у відповідній документації на виріб) і він не може застосовуватись у мережі з ізольованою нейтраллю.

Обговорення результатів. З наведених графіків можна зробити висновок, що розбіжності у значеннях струму при номінальній напрузі U_n , зазвичай, незначні, оскільки всі ТН працюють на лінійній ділянці кривої намагнічування, і всі вимірювальні параметри будуть в межах допустимого, включаючи і один з основних контрольованих параметрів – клас точності обмоток. Але вже при напрузі $1,9 \cdot U_n$ при виникненні ОЗЗ розбіжності у значеннях струму холостого ходу можуть бути суттєвими, але, зазвичай, це ніхто не

контролює і цьому не приділяється особлива увага. Значення похибки ТН в цих інтервалах також не вимірюються. Таким чином, вимірювання характеристик ТН в режимі холостого ходу тільки при номінальній напрузі U_n не дає змоги достовірно встановити особливості роботи ТН у режимі ОЗЗ.

Отже, як показує практика і досвід експлуатації ТН, а також наявні дані щодо вимірювання ВАХ ТН, можна зробити висновок, що навіть серед однієї партії ТН одного виробника не спостерігається стабільності характеристик намагнічування. Це в першу чергу може бути пов'язано з особливостями технології виробництва ТН, відсутністю необхідних випробувань, методів контролю та чітких критеріїв щодо придатності ТН. Діючий стандарт [5] встановлює вимоги, що трифазні ТН, а також трифазні групи однофазних ТН з додатковими обмотками, що призначені для контролю ізоляції в мережах з ізолюваною нейтраллю, повинні витримувати ОЗЗ не менше 8 годин при найбільшій робочій напрузі (для мереж 6–35 кВ це $1,2$ від номінального значення). Також, як зазначалось раніше, однофазні ТН мають протягом 8 годин витримувати напруги із коефіцієнтом напруги $1,9$ між фазою і землею в мережі з ізолюваною нейтраллю без автоматичного відключення при ОЗЗ [5]. Стосовно методів контролю та критеріїв оцінки цих вимог майже відсутні, оскільки:

1) випробування на стійкість ТН до тривалого ОЗЗ відносяться тільки до кваліфікаційних випробувань конкретного типу ТН, тобто проводяться тільки на окремих випробувальних зразках;

2) вимірювання струму холостого ходу відносяться до прийнятно-здавальних випробувань, але певним чином умовно, оскільки:

- струм холостого ходу повинен бути встановлений виробником та вказаний в експлуатаційній документації на ТН конкретних типів [5];

- метод випробувань щодо вимірювання струму холостого ходу в основному встановлює такі методи для силових трансформаторів, і жодних особливих вимог щодо методики випробувань вимірювальних ТН, що заземлюються, не регламентує.

Як показала практика, виробники ТН зазвичай проводять вимірювання струму холостого ходу при напрузі U_n або $1,2 \cdot U_n$ із зазначенням вимірюваного значення в паспорті конкретного ТН. Жодних критеріїв працездатності з точки зору отриманого значення струму холостого ходу при цьому не встановлюється, незалежно від того, яке значення отримано – $0,15$, $0,5$ чи 1 А. Це отримане значення вказується в паспорті ТН і служить переважно тільки для того, щоб при введенні ТН в експлуатацію провести його перевірку на відсутність міжвиткових замикань в обмотках шляхом порівняння вимірюваного значення струму холостого ходу зі значенням, зазначеним у паспорті ТН.

Що стосується ізоляції ТН, то у зв'язку з тим, що один з терміналів (Х) первинної обмотки ТН має бути заземлений при експлуатації і проведенні випробувань, то ізоляція ТН на підприємствах-виробниках

перевіряється прикладеною або ж індукованою напругою підвищеної частоти $150\text{--}400$ Гц. При випробуваннях ізоляції РП, що проводяться на частоті 50 Гц, ТН відключаються та не випробовуються. Ізоляцію ТН безпосередньо на об'єктах замовника повною випробувальною напругою також перевірити неможливо.

Аналізуючи документацію на ТН різних виробників, можна побачити, що, як правило, всі допускають проведення випробувань на частоті 50 Гц напругою $1,2 \cdot U_n$. Наприклад, для ТН типу ЗНОЛ-6 з номінальною напругою первинної обмотки $U_n = 6000/\sqrt{3} \approx 3464$ В це значення становить $1,2 \cdot U_n \approx 4157$ В протягом 1 хв. На практиці ж під час експлуатації при ОЗЗ на двох інших «здорових» фазах буде виникати лінійна напруга, тобто 6000 В, а при найбільшій робочій напрузі в мережі в $1,2$ рази більша – 7200 В. Отже виходить, що випробувальна напруга, яку рекомендує підприємство-виробник на частоті 50 Гц, є нижчою навіть за робочу напругу, що може призвести до виникнення проблем з ізоляцією ТН при ОЗЗ. Зважаючи на те, що в мережах $6\text{--}35$ кВ з ізолюваною нейтраллю скрізь встановлені трифазні групи ТН з литою ізоляцією, що заземлюються, без належного проведення перевірки їх працездатності у режимі ОЗЗ, то стає зрозумілим зростання кількості пошкоджень ТН навіть при їх захисті топками запобіжниками [2–4, 6].

Рекомендації щодо ймовірних шляхів вирішення проблеми. Рівень якості ТН, що присутній на вітчизняному ринку, звичайно, є різним і залежить переважно від розуміння проблеми технічним персоналом підприємств-виробників ТН, від їх компетенції, та від рівня наявної на підприємстві технології. Оскільки в діючому стандарті [5] відсутні вимоги щодо перевірки ТН при ОЗЗ, то варто його скоригувати з урахуванням вищевикладеної проблеми.

З метою зменшення кількості випадків виходів з ладу вбудованих у ТН запобіжників експлуатуючим компаніям, що мають у своєму господарстві ТН з литою ізоляцією, що заземлюються, на клас напруги $6\text{--}35$ кВ рекомендується перевірити струм холостого ходу на основній вторинній обмотці ТН до напруги $1,9 \cdot U_n$ і зробити відповідні висновки з урахуванням викладеного вище матеріалу.

Виробникам ТН рекомендується зазначати в інструкції на виробі з номінальним коефіцієнтом напруги $1,9$ протягом 8 годин значення струму холостого ходу не тільки при $1,2 \cdot U_n$, але і при $1,9 \cdot U_n$ згідно [5]. Багато також ввести обмеження значення струму холостого ходу однофазних ТН з литою ізоляцією, що заземлюються, наприклад, на рівні до $0,5\text{--}0,6$ А при $1,9 \cdot U_n$, що б могло слугувати додатковим параметром придатності виробів.

Таким чином, на підставі досвіду експлуатації та вищевикладеного матеріалу можна з високим рівнем упевненістю заключити, що розв'язання зазначених проблем із ТН може практично повністю вирішити проблему частих виходів з ладу топких запобіжників у режимі ОЗЗ та при інших перенапругах, що виникають

з різних причин (ферорезонанс, грозові перенапруги тощо), а також може суттєво знизити пошкоджуваність ТН з литою ізоляцією, що заземлюються, в електричних мережах середньої напруги 6–35 кВ із ізолюваною нейтраллю. Це рішення має бути комплексним і торкатись як топких запобіжників щодо подолання неузгодженості значень їх номінативного струму і гранично допустимого тривалого струму первинної обмотки ТН, так і власне самих ТН щодо зменшення струму холостого ходу при перенапругах і уникнення входження магнітопроводу ТН в режим насичення.

Висновки. В статті проведено дослідження причин виходу з ладу топких запобіжників для захисту ТН, що заземлюються, з литою ізоляцією середньої напруги 6–35 кВ. Показано, що існує проблема неузгодженості значень номінативного струму топкої вставки запобіжника для захисту ТН і гранично допустимого тривалого струму первинної обмотки ТН.

На основі проведених досліджень визначено, що в ТН певних виробників магнітна індукція в магнітопроводі при номінальній напрузі U_n може значно перевищувати значення 0,95 Тл. В результаті магнітопровід ТН в режимі перенапруги $1,9 \cdot U_n$, яка згідно стандарту може тривати 8 годин, входить в режим насичення, і в первинній обмотці ТН з'являється значний струм, що може у десятки разів перевищувати номінативне значення. При наявності запобіжника в колі первинної обмотки ТН це може призвести до його спрацьовування, або ж, при його відсутності, призведе до перегріву ТН з наступним виходом його з ладу.

Запропоновано рекомендації щодо вирішення наявної проблеми, застосування яких на практиці з високою ймовірністю дозволить вирішити проблему частих виходів з ладу топких запобіжників у режимі ОЗЗ, а також може суттєво знизити пошкоджуваність ТН з литою ізоляцією, що заземлюються, в електричних мережах середньої напруги 6–35 кВ із ізолюваною нейтраллю.

Список літератури

1. Impact transient characteristics and selection method of voltage transformer fuse / K. Wang et al. *Energies*. 2019. Vol. 12, no. 4. 737. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12040737>.
2. To the problem of protection of medium voltage instrument transformers with fuses: analytical research / Y. Bajda et al. *Lighting Engineering & Power Engineering*. 2021. Vol. 60, no. 3. P. 92–102. DOI: <https://doi.org/10.33042/2079-424x.2021.60.3.02>.
3. Ганус О. І., Старков К. О. Дослідження характеру перенапруг в електричній мережі, що виникають при роботі трансформаторів напруги. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Енергетика, надійність та енергоефективність*. 2021. № 1 (2). С. 28–36. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.01.05>.
4. Байда Є. І., Греčko О. М. Мультифізичний розрахунок топких запобіжників вимірювальних трансформаторів середньої напруги. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2023. № 1 (9). С. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2023.1.01>.
5. ДСТУ ГОСТ 1983-2003. Трансформатори напруги. Загальні технічні умови (ГОСТ 1983-2001, ІДТ). На заміну ГОСТ 1983-89; чинний від 2003-07-01. Вид. офіц. 2003.
6. Байда Є., Греčko О. Використання методу Монте-Карло для оцінки розбіжності спрацьовування топкого запобіжника в

залежності від розбіжності його теплофізичних та геометричних параметрів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2024. № 2 (12). С. 3–7. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2024.2.01>.

7. Ферорезонансні процеси в електромережах 10 кВ з різнотипними трансформаторами напруги / А. В. Журахівський та ін. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 2. С. 73–78.
8. Саєнко Ю. Л., Попов А. С. Исследование причин повреждения трансформаторов напряжения контроля изоляции. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2011. № 7 (89). С. 59–66.
9. Малиновський А. А., Гушин Є. Ю. Вплив аварійних режимів мережі на роботу трансформаторів напруги НОМ-10. *Науковий вісник НГУ*. 2015. № 1. С. 89–93.
10. Ганус А. И. Экспериментальное определение границ областей возможных затухающего и незатухающего феррорезонансных процессов в электрических сетях с изолированной нейтралью с трансформаторами напряжения. *Світлотехніка та електроенергетика*. 2006. № 7-8. С. 77–85.
11. Тугай Ю. І., Ганус О. І., Старков К. О. Комутаційні перенапруги у трансформаторах напруги. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 5. С. 73–75. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.073>.
12. ТОВ «Кварц». Запобіжники струмообмежуючі серії ПКТ та ПКТН. Технічний опис та інструкція з експлуатації. Запоріжжя. 17 с. URL: https://quartz.zp.ua/uploads/files/products/pkt_pkn_ua.pdf.
13. ГОСТ 1516.3-96. Электрообладнання змінного струму на напруги від 1 до 750 кВ. Вимоги до електричної міцності ізоляції. Чинний від 2000-01-01. Вид. офіц.

References

1. K. Wang, H. Liu, Q. Yang, L. Yin, and J. Huang, "Impact transient characteristics and selection method of voltage transformer fuse," *Energies*, vol. 12, no. 4, Feb. 2019, Art. no. 7376 doi: <https://doi.org/10.3390/en12040737>
2. Y. Bajda, O. Grechko, V. Buhaichuk, and R. Knápek, "To the problem of protection of medium voltage instrument transformers with fuses: Analytical research," *Lighting Engineering & Power Engineering*, vol. 60, no. 3, pp. 92–102, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.33042/2079-424x.2021.60.3.02>
3. O. Hanus and K. Starkov, "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*, no. 1 (2), pp. 28–36, Jul. 2021, doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.01.05> (in Ukrainian)
4. Y. Bajda and O. Grechko, "Multiphysics calculation of fuses of medium voltage measuring transformers," *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, no. 1 (9), pp. 3–10, Jun. 2023, doi: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2023.1.01> (in Ukrainian)
5. *Transformatory napruhy. Zahalni tekhnichni umovy (HOST 1983-2001, IDT) [Voltage transformers. General technical conditions (HOST 1983-2001, IDT)]*, DSTU HOST 1983-2003, Ukrainian Scientific Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality Problems, 2003. (in Ukrainian)
6. E. Bajda and O. Grechko, "Using the Monte-Carlo method for assessing the difference in the operation of the fuel protector depending on the difference in its thermal physical and geometric parameters," *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, no. 2 (12), pp. 3–7, Dec. 2024, doi: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2024.2.01> (in Ukrainian)
7. A. V. Zhurakhivskiy, Yu. A. Kents, A. Ya. Yatseiko, and R. Ya. Masliak, "Ferorezonansni protsesy v elektromerezhakh 10 kV z riznotypnyimi transformatoramy napruhy [Ferroresonance processes in electrical networks 10 kV with different voltage transformers]," *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 2, pp. 73–78, 2010. (in Ukrainian)
8. Yu. L. Saenko and A. S. Popov, "Investigation of the damage cause of the voltage transformers using for insulation checking," *Energy Saving. Power Engineering. Energy*, no. 7 (89), pp. 59–66, 2011. (in Russian)
9. A. A. Malinovskyi and Ye. Yu. Hushchyn, "Network faults impact on operation of NOM-10 voltage transformers," *Naukovyi Visnyk*

- Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 1, pp. 89–93, 2015. (in Ukrainian)
10. O. I. Hanus, “Experimental determination of the domain boundaries of the possible damping and persistent ferroresonance processes in the electric networks with the insulated neutral with the voltage transformers,” *Lighting Engineering & Power Engineering*, no. 7-8, pp. 77–85, 2006. (in Russian)
 11. Y. I. Tugay, O. I. Ganus, and K. O. Starkov, “The switching in voltage transformer,” *Tekhnichna Elektrodynamika*, vol. 2016, no. 5, pp. 73–75, Sep. 2016, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.073> (in Ukrainian)
 12. LLC «Quartz», “Zapobizhnyky strumobmezhuiuchi serii PKT ta PKN. Tekhnichniy opys ta instruktsiia z ekspluatatsii [Current-limiting fuses of the PKT and PKN series. Technical description and operating instructions],” Zaporizhzhia, UITsH. 674351.004 TO. [Online]. Available: https://quartz.zp.ua/uploads/files/products/pkt_pkn_ua.pdf (in Ukrainian)
 13. *Elektroobladnannia zminnoho strumu na napruhy vid 1 do 750 kV. Vymohy do elektrychnoi mitsnosti izoliatsii [AC electrical equipment for voltages from 1 to 750 kV. Requirements for electrical strength of insulation]*, HOST 1516.3-96, Technical Committee for Standardisation TC 37 “Electrical equipment for power transmission and distribution”. (in Russian)

Надійшла (received) 6.12.2025

UDC 621.316

GRECHKO OLEKSANDR ✉ – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Electrical Apparatus Department, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7872-8585>; e-mail: a.m.grechko@gmail.com.

FAILURE CAUSES OF FUSES FOR THE PROTECTION OF MEDIUM-VOLTAGE INSTRUMENT TRANSFORMERS WITH EPOXY RESIN

The article considers the problem of frequent failures of fuses used to protect grounded instrument transformers of medium voltage with epoxy resin, as well as the instrument transformers themselves, which is observed both during emergency modes in 6–35 kV networks with an insulated neutral, but also when single-phase ground faults occur, which are not emergency. A study was carried out to establish the causes of failure of fuses for instrument transformers protection. A study of the volt-ampere characteristics of three instrument transformers of different manufacturers was conducted. Discrepancies were established in the values of the no-load current during overvoltages in the event of single-phase ground faults. It is shown that in instrument transformers of certain manufacturers, the magnetic induction in the magnetic core at nominal voltage can significantly exceed the value of 0.95 T. In this case, the instrument transformer magnetic core in the overvoltage mode, which according to the standard can last for 8 hours, enters the saturation mode, and a significant current appears in the instrument transformer primary winding, which can exceed the nominal value by tens of times. This can lead to the operation of the fuse in the instrument transformer primary winding circuit, and in its absence will lead to overheating of the instrument transformer with a probable failure. Recommendations are proposed on possible ways to solve the existing problem, the application of which in practice will with a high probability allow solving the problem of frequent failures of fusible fuses in the single-phase ground faults mode, and can also significantly reduce the damageability of instrument transformers with epoxy resin, which are grounded, in medium voltage electrical networks of 6–35 kV with an isolated neutral.

Keywords: fuse; voltage instrument transformer; epoxy resin; medium voltage; single-phase ground fault; overvoltage; voltage transformer no-load current; voltage transformer magnetic core; saturation induction.