

Грідяєв Володимир Васильович, старший викладач, доктор філософії, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0001-7767-4490

Манідіна Євгенія Анатоліївна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-4090-9991

Савельєв Дмитро Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри охорони праці та цивільної безпеки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», ORCID: 0000-0002-0738-3273

Румянцев Владислав Ростиславович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-4404-3454

Карпенко Ганна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-3504-0283

КОМПЛЕКСНА БЕЗПЕКА ЕЛЕКТРИЧНИХ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ В УМОВАХ ВОРОЖИХ ОБСТРІЛІВ: ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКА, ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА ТА ЦИВІЛЬНИЙ ЗАХИСТ

У статті розглянуто питання комплексної безпеки силових трансформаторів в умовах збройної агресії та регулярних обстрілів критичної енергетичної інфраструктури. Акцентовано увагу на необхідності інтеграції трьох взаємопов'язаних складових: електробезпеки, пожежної безпеки та заходів цивільного захисту. Детально проаналізовано наявні методи фізичного захисту трансформаторів. Найбільш доступним та результативним способом захисту трансформаторів від атак дронів-камікадзе є використання бетонних укриттів. Вони надійно захищають від уламків, вибухової хвилі та теплового впливу у разі загорянь поблизу. Проте застосування таких конструкцій потребує обов'язкового врахування одного ключового чинника – дотримання температурного балансу трансформатора. В роботі особливу увагу приділено вивченню впливу таких захисних конструкцій на тепловий режим роботи трансформаторів.

За результатами тривимірного теплотехнічного моделювання трансформатора типу ТМ-1000/10 з урахуванням теплообміну з навколишнім середовищем встановлено, що за відсутності належної вентиляції температура трансформаторного мастила може перевищувати 100 °C вже через одну годину роботи, що істотно підвищує ризик термічного ушкодження ізоляції, виникнення пожежі або повного виходу з ладу енергообладнання. Показано, що основним фактором надійної роботи трансформатора в умовах захисного укриття є забезпечення достатнього повітрообміну. Змодельовано залежність необхідної витрати повітря від допустимого підвищення температури для трансформатора ТМ-1000/10.

Встановлено, що при невеликому допуску на підвищення температури (2–5 °C) потрібні значні витрати повітря – понад 10 000 м³/год, що може бути складно реалізувати у практичних умовах. У діапазоні 10–15 °C витрата повітря знижується до 3000–4000 м³/год – це характерно для систем природної або штучної вентиляції. Додатково розглянуто вплив швидкості повітряного потоку на зниження температурної різниці трансформатора в умовах природної вентиляції. Отримані результати дозволяють кількісно оцінити негативний вплив обмеженого повітрообміну через бетонні укриття на тепловий режим трансформатора і вказують на необхідність врахування вентиляційних умов при проектуванні систем енергозабезпечення в умовах додаткового захисту.

Ключові слова: силовий трансформатор, бетонне укриття, пожежна безпека, електробезпека, вентиляція, тепла модель, гібридна війна

Вступ. В умовах сучасних гібридних і відкритих збройних конфліктів, коли критична інфраструктура часто стає об'єктом атак, особливого значення набуває захист енергетичної системи. Силові трансформатори, як ключові елементи електромережі, вразливі до уражень ракетами, дронами-камікадзе та артилерійськими ударами. Їх виведення з ладу призводить до масштабних відключень електроенергії, порушення роботи промисловості, транспорту та об'єктів цивільного призначення [1,2].

Силові трансформатори зазвичай встановлюються на відкритих майданчиках підстанцій. Вони мають великі габарити, складну конструкцію та використовують масло як охолоджувач і ізолятор. Пряме попадання снаряду або уламків може спричинити: витік і загоряння мастила, руйнування корпусу й активної частини, коротке замикання або повне знищення обладнання.

Оскільки виготовлення та постачання потужного трансформатора може зайняти від кількох місяців до року, кожна втрата – критична.

Відомі такі основні підходи до захисту трансформаторів від ворожих обстрілів [1-3]:

1. Пасивний фізичний захист – це один з найбільш ефективних методів, який використовує:

- бетонні укриття або захисні екрани, які здатні витримати уламки або удар малої ракети;

- земляні вали або габіони, які розсіюють вибухову хвилю та уламки;

- броньовані капсули для трансформаторів (як частина нового підходу до модульного захисту).

2. Маскування і дезорієнтація противника: використання камуфляжних сіток, теплових пасток, імітаторів трансформаторів дозволяє знизити ймовірність прямого влучання. Це особливо актуально при атаках дронів, які орієнтуються на теплові сигнатури.

3. Активні системи ППО: встановлення поблизу критичних підстанцій елементів протиповітряної оборони (ЗРК, ПЗРК, засобів РЕБ) дає змогу знищувати повітряні загрози на підльоті. Найбільшу ефективність демонструє комбінація фізичного захисту та ППО.

4. Резервування і мобільність: використання мобільних трансформаторних підстанцій дозволяє оперативно замінити пошкоджене обладнання та підтримати роботу мережі до відновлення стаціонарного об'єкта.

Постановка завдання. Таким чином, захист трансформаторів це завдання, яке вимагає міждисциплінарної кооперації: енергетиків, інженерів, військових та науковців. Уже зараз в Україні та за кордоном розробляються інноваційні модульні конструкції укриттів, інтелектуальні системи виявлення загроз, інерційні масляні бар'єри, які можуть зменшити наслідки вибуху. Разом із тим, залишається недостатньо опрацьованим напрям аналізу теплонавантаження трансформаторів в умовах часткового або повного укриття, що може мати критичний вплив на їхню працездатність. Захисні конструкції, з одного боку, мають екранувати трансформатори від ударних і термічних чинників, а з іншого – не повинні погіршувати їхнє тепловідведення до навколишнього середовища. Це ставить завдання пошуку оптимального балансу між рівнем фізичного захисту та ефективністю теплових процесів. Отже, необхідно розробити математичну модель оцінки температурного режиму трансформатора з урахуванням параметрів укриття, теплофізичних характеристик середовища та режимів експлуатації. Такий підхід дозволить прогнозувати граничні умови нагріву та уникати аварійних ситуацій, спричинених перегрівом трансформаторного обладнання.

Результати дослідження. Як показав практичний досвід, найбільш ефективним і простим способом захисту трансформаторів від дронів-камікадзе є бетонні укриття (рис. 1). Ці конструкції ефективно стримують уламки, вибухову хвилю, тепловий вплив при загоряннях поблизу. Водночас, використання таких засобів вимагає чіткого врахування одного критично важливого аспекту – температурного балансу трансформатора.

У процесі експлуатації трансформатора відбувається утворення тепла в його обмотках і магнітопровідних елементах. Наслідками порушення температурного режиму під час роботи трансформатора можуть бути такі:



Рисунок 1 – Бетонне укриття трансформатора

- перевищення граничної температури обмоток призводить до прискореного старіння ізоляції та зниження ресурсу трансформатора;
- ризик аварійного відключення або спрацювання захисту за температурою;
- підвищення тиску в маслосистемі, що може спричинити витік або пошкодження корпусу.

– виникнення пожежі при розігріві мастила вище допустимих меж.

Отже тепло, яке утворюється має бути ефективно відведене, щоб запобігти перегріванню обладнання.

Внутрішнє охолодження трансформатора забезпечується циркуляцією мастила. А передача тепла від трансформатора до навколишнього середовища здійснюється переважно завдяки конвекції повітря навколо зовнішніх поверхонь бака, охолоджувальних труб та інших елементів конструкції, а також через теплове випромінювання. Інтенсивність теплообміну визначається температурною різницею між поверхнею трансформатора та навколишнім повітрям, геометричними параметрами охолоджуваних елементів та умовами доступу повітря до них. Чим більше відкритий доступ повітря до охолоджуваних поверхонь, тим ефективніше відбувається охолодження [5].

Отже, конвекція є основним механізмом теплообміну в трансформаторах. Кількість теплоти, що передається конвекцією, Q , Вт, описується таким виразом:

$$Q = h \cdot A \cdot (t_1 - t_2) \quad (1)$$

де h – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К); A – площа поверхні теплообміну, м²; t_1 – температура на нагрітій поверхні, °С; t_2 – температура на охолоджувальній поверхні трансформатора, °С.

Температура на охолоджувальній поверхні трансформатора зазвичай визначається як температура навколишнього середовища. Наявність бетонних укриттів або інших конструктивних обмежень може перешкоджати вільному повітрообміну, що знижує ефективність природної вентиляції та підвищує температуру навколишнього середовища і може привести до порушення роботи трансформатора.

Таким чином, основним чинником ефективності охолодження трансформатора є інтенсивність теплообміну через конвекцію, яка безпосередньо залежить від температурного градієнта та умов доступу повітря до поверхонь теплообміну.

Для кількісного оцінювання цього впливу необхідно провести умовне моделювання теплових процесів, що відбуваються під час роботи трансформатора.

Для оцінки впливу вентиляції на тепловий режим силового трансформатора проведено моделювання динаміки нагрівання трансформаторного мастила при роботі в умовах з наявною вентиляцією та без неї.

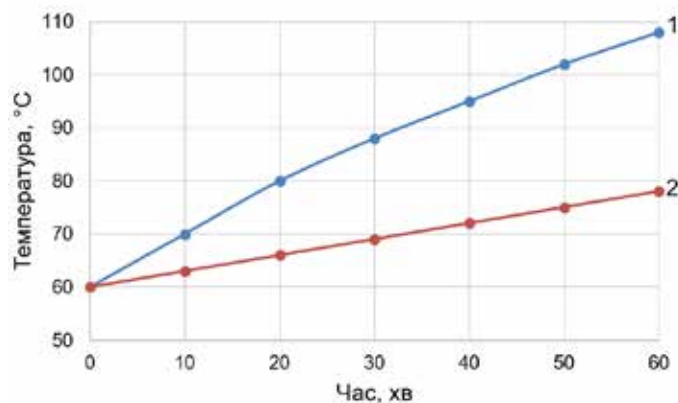
З огляду на домінуючу роль конвекції у відведенні тепла від трансформатора, для оцінки впливу вентиляції на тепловий режим трансформатора використано спрощену теплотехнічну модель. Вона базується на балансовому рівнянні надходження і відведення теплоти [7]:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P_{\text{втрат}} - hA(t - t_{\text{пов}})}{m \cdot c} \quad (2)$$

де $P_{\text{втрат}}$ – сумарні теплові втрати у трансформаторі, Вт; h – коефіцієнт теплопередачі, що змінюється залежно від умов вентиляції, Вт/(м²·К); A – площа поверхні теплообміну, м²; t – температура мастила, °С; $t_{\text{пов}}$ – температура повітря навколо трансформатора, °С; m – маса трансформаторного мастила, кг; c – питома теплоємність трансформаторного мастила, кДж/(кг·К).

Для визначення динаміки температури трансформаторного мастила було змодельовано змiну температури впродовж 60 хвилин експлуатації як з ефективною вентиляцією (зовнішнє охолодження не обмежене), так і без неї (укриття перешкоджає повітрообміну). Для моделювання теплового режиму було обрано типовий маслонаповнений силовий трансформатор з природним охолодженням типу ТМ-1000/10, призначений для роботи у розподільчих електромережах, рис. 2. Основні технічні характеристики трансформатора [8]: номінальна потужність – 1000 кВА; номінальна напруга – 10/0,4 кВ; тип охолодження – ONAN (масляне, природна циркуляція мастила та повітря); втрати холостого ходу – 1,5 кВт; втрати короткого замикання – 10,5 кВт; маса трансформаторного мастила – приблизно 800 кг; питома теплоємність мастила – 1900 Дж/(кг·К); загальна площа охолоджувальної поверхні – близько 15 м²; матеріал бака – сталь з радіаторними трубами; габаритні розміри трансформатора (без укриття) – 2100×1300×1700 мм.

Вибір цього типу трансформатора зумовлений його широким застосуванням у міських та сільських підстанціях, де питання охолодження особливо актуальні при розміщенні обладнання в обмежених умовах (захисні бетонні конструкції, укриття, вузькі технічні приміщення).



1 – без застосування вентиляції; 2 – із застосуванням вентиляції

Рисунок 2 – Динаміка підвищення температури трансформаторного мастила за умов наявності та відсутності вентиляції

Відповідно до рис. 2 обидві криві стартують з однакової початкової температури трансформаторного мастила (близько 60 °С), що відповідає типовій температурі після короткого періоду безнавантаженої роботи або перед запуском навантаження. Крива 1, яка відповідає випадку без вентиляції укриття протягом 60 хв температурний профіль демонструє суттєво різні темпи зростання залежно від ефективності теплообміну

з навколишнім середовищем. Температура підвищується лінійно, досягаючи приблизно 108 °С через 60 хвилин роботи.

Такий стрімкий ріст вказує на низький коефіцієнт теплопередачі h , обумовлений поганим повітрообміном (наявністю бетонних укріттів, обмеженого простору тощо). Лінійність графіка (крива 1, рис. 2) свідчить про домінування теплових втрат над процесами тепловідведення, тобто кількість теплоти, що надходить у мастило, значно перевищує кількість теплоти, що виводиться з системи. Температури вище 95–100 °С є небезпечними: це підвищує ризик прискореного старіння ізоляції, утворення газів розкладу, а також виникнення аварійних режимів роботи [4]. Це створює умови для виникнення локального загоряння або навіть вибуху трансформаторного бака.

У випадку використання вентиляції укріття, крива 2, рис. 2) температура також підвищується, але значно повільніше, досягаючи лише 78 °С за той самий період. Це вказує на вищий коефіцієнт h – за рахунок природної конвекції повітря, що безперешкодно охолоджує зовнішні поверхні бака трансформатора. Крива 2, рис. 2, має сповільнене зростання, що свідчить про наближення системи до теплової рівноваги – відведення тепла майже зрівнюється з його надходженням. Це означає, що система охолодження працює ефективно, забезпечуючи стабільний тепловий режим, без ризику перегріву.

Окремо було змодельовано залежність різниці температур між трансформатором із вентиляцією та без неї (Δt) від швидкості повітряного потоку. Відомо, що коефіцієнт теплопередачі для примусової конвекції збільшується зі зростанням швидкості повітря приблизно як [9]:

$$h \sim v^n, \quad n \in [0,5; 0,8] \quad (3)$$

Саме це обумовлює зниження Δt при посиленні вентиляції. Для підтвердження цього прорахуємо зміну різниці температур від швидкості повітря в діапазоні 0,1–0,2 м/с, що є типовим для трансформаторних підстанцій з природною або штучною вентиляцією, рис. 3.

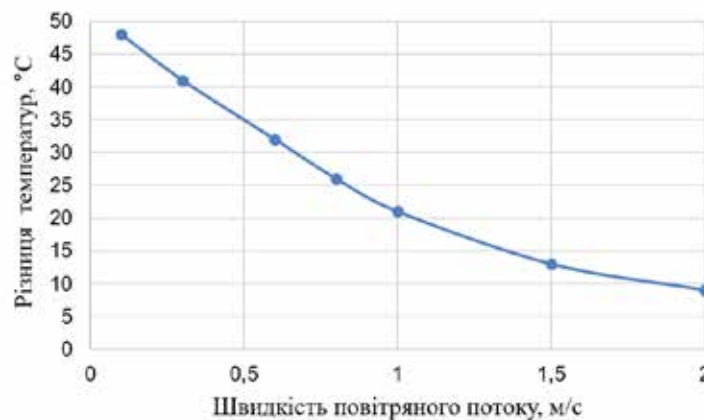


Рисунок 3 – Залежність температурної різниці Δt між трансформатором з та без вентиляції від швидкості повітряного потоку

Таким чином, отримані результати (рис. 2, рис. 3) дозволяють кількісно оцінити негативний вплив обмеженого повітрообміну (наприклад, через бетонні укріття) на тепловий режим трансформатора і вказують на необхідність врахування вентиляційних умов при проєктуванні систем енергозабезпечення в умовах додаткового захисту.

Оцінити обсяг повітря, який необхідно прокачувати через бетонне укріття силового трансформатора ТМ-1000/10 для підтримання теплового балансу та уникнення перегріву, можна з врахуванням теплової потужності трансформатора за наступною формулою:

$$Q = \frac{\rho \cdot L \cdot c \cdot \Delta t}{3600} \quad (4)$$

де Q – теплова потужність, Вт; ρ – густина повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$; L – об’ємна витрата повітря, $\text{м}^3/\text{год}$; C – питома теплоємність повітря, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$; Δt – допустиме підвищення температури, $^{\circ}\text{C}$.

Допустима температура в укритті трансформатора залежить від типу трансформатора, його класу ізоляції, стандартів, за якими він виготовлений, а також умов експлуатації [4].

На рис. 4 змодельовано залежність необхідної витрати повітря від допустимого підвищення температури для трансформатора ТМ-1000/10.

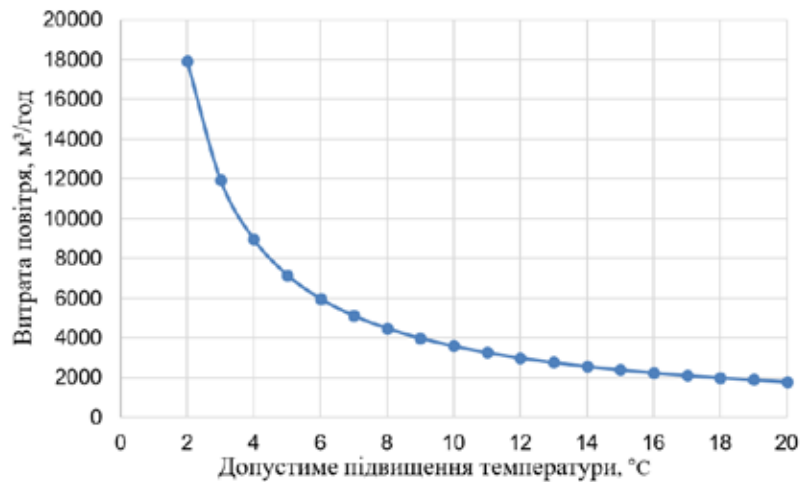


Рисунок 4 – Залежність необхідної витрати повітря від допустимого підвищення температури

Відповідно до рисунку 3 встановлено, що при невеликому допуску на підвищення температури ($2\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$) потрібні значні витрати повітря – понад $10\,000\text{ м}^3/\text{год}$, що може бути складно реалізувати у практичних умовах. У діапазоні $10\text{--}15\text{ }^{\circ}\text{C}$ витрата повітря знижується до $3000\text{--}4000\text{ м}^3/\text{год}$ – це характерно для систем природної або штучної вентиляції.

Таким чином, підбір параметрів вентиляції укриття трансформатора має здійснюватися з урахуванням обмежень, пов’язаних з допустимим тепловим навантаженням та можливостями вентиляційної системи.

Висновки. У контексті сучасної гібридної війни трансформатори є пріоритетною ціллю для ворога, оскільки їх пошкодження викликає масштабні перебої електропостачання. Їх складність, великі габарити та тривалий цикл заміни роблять кожну втрату особливо значущою. Найефективніший підхід до захисту трансформаторів – поєднання фізичного захисту, активної ППО, маскування та резервування. Найбільш дієвим засобом проти дронів-камікадзе доведено використання бетонних укриттів, які стримують уламки та тепловий вплив. Встановлено, що укриття можуть істотно зменшити ефективність природної вентиляції, що призводить до перегріву трансформатора. Проведене моделювання показало, що температура мастила в трансформаторі ТМ-1000/10 без вентиляції може перевищити $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ за годину – що є критичним і загрожує аварійним відключенням, пожежами або пошкодженням ізоляції. Отже, потрібне врахування теплотехнічних параметрів при проєктуванні укриттів трансформаторів. Теплотехнічні розрахунки демонструють, що для збереження теплового балансу потрібно забезпечити вентиляцію з об’ємною витратою повітря від 3000 до $10\,000\text{ м}^3/\text{год}$, залежно від допустимого підвищення температури.

Бібліографічний перелік

1. Росія нищить українські трансформатори. Як їх захистити і чим вони важливі. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/features-63801303>
2. Юрченко В., Соколовський І. Шляхи удосконалення інженерно-технічних заходів цивільного захисту об’єктів критичної інфраструктури в умовах особливого

періоду. *Науковий вісник: Державне управління*, 2023. № 1 (13). С. 291-312. [https://doi.org/10.33269/2618-0065-2023-1\(13\)-291-312](https://doi.org/10.33269/2618-0065-2023-1(13)-291-312).

3. Захист критичної інфраструктури в умовах надзвичайних ситуацій: монографія / С.І. Азаров, В.Л. Сидоренко, С.А. Єременко, А.В. Пруський, А.М. Демків; за заг. ред. П.Б. Волянського. Київ, 2021. 375 с.

4. Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання). URL: <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf>.

5. ДСТУ 3463-96 Керівництво з навантаження силових масляних трансформаторів (ГОСТ 14209-97, ІЕС 354-91). З Поправкою (ІПС № 11-1999). URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_3463-96_kerivnictvo_z_navantazhennya_silovikh_maslyanikh.pdf.

6. Вплив температурних умов на роботу сухого трансформатора. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/4f109eec-a190-48aa-8cfb-503aed70df34/download>.

7. IEC 60076-2:2011 Power transformers. Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers. International Electrotechnical Commission. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/15221/c6a77584aa9145539aadd9eb505ea4c1/IEC-60076-2-2011.pdf>.

8. Каталог продукції ПАТ "Запоріжтрансформатор" (ZTR). URL: <https://ztr.ua>.

9. Incropera, F. P., DeWitt, D. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. – 6th ed. John Wiley & Sons, 2007. 997 p.

References

1. Russia is destroying Ukrainian transformers: how to protect them and why they matter. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/features-63801303>

2. Yurchenko V., Sokolovskyi I. Ways to improve engineering and technical civil protection measures for critical infrastructure facilities during special periods. *Scientific Bulletin: Public Administration*, 2023. No. 1 (13), pp. 291–312. [https://doi.org/10.33269/2618-0065-2023-1\(13\)-291-312](https://doi.org/10.33269/2618-0065-2023-1(13)-291-312)

3. Protection of critical infrastructure in emergency situations: monograph / S.I. Azarov, V.L. Sydorenko, S.A. Yeremenko, A.V. Pruskyi, A.M. Demkiv; general ed. by P.B. Volianskyi. Kyiv, 2021. 375 pages.

4. Rules for Electrical Installations (first revised, reworked, supplemented and adapted edition for Ukraine). URL: <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf>

5. DSTU 3463-96 Guidelines for loading oil-immersed power transformers (GOST 14209-97, IEC 354-91). With Amendment (IPS No. 11-1999). URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_3463-96_kerivnictvo_z_navantazhennya_silovikh_maslyanikh.pdf

6. The impact of temperature conditions on the operation of dry transformers. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/4f109eec-a190-48aa-8cfb-503aed70df34/download>

7. IEC 60076-2:2011 Power transformers. Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers. International Electrotechnical Commission. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/15221/c6a77584aa9145539aadd9eb505ea4c1/IEC-60076-2-2011.pdf>.

8. Product Catalog of PJSC "Zaporizhtransformator" (ZTR) URL: <https://ztr.ua>.

9. Incropera, F. P., DeWitt, D. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. – 6th ed. John Wiley & Sons, 2007. 997 p.

Gridiaiev Volodymyr, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0001-7767-4490.

Manidina Yevheniia, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0003-4090-9991.

Saveliev Dmitry, candidate of technical science, associate professor of the department of labor protection and civil security, Dnipro University of Technology, ORCID: 0000-0002-0738-3273

Rumyantsev Vladislav, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-4404-3454

Karpenko Hanna, candidate of technical sciences, associate professor of the department, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0003-3504-0283

**COMPREHENSIVE SAFETY OF ELECTRICAL POWER TRANSFORMERS
UNDER HOSTILE SHELLING: ELECTRICAL SAFETY, FIRE SAFETY,
AND CIVIL PROTECTION**

The article examines the comprehensive safety of power transformers under conditions of armed aggression and ongoing shelling of critical energy infrastructure. Emphasis is placed on the necessity of integrating three interrelated components: electrical safety, fire safety, and civil protection measures. Existing methods of physical protection for transformers are thoroughly analyzed. Particular attention is given to the impact of such protective structures on the thermal operating conditions of transformers.

Based on three-dimensional thermal modeling of a TM-1000/10 transformer, accounting for heat exchange with the environment, it was found that without adequate ventilation, the temperature of the transformer oil can exceed 100 °C within just one hour of operation. This significantly increases the risk of thermal degradation of insulation, fire, or complete equipment failure.

The study shows that ensuring sufficient air exchange is the key factor for the reliable operation of a transformer under protective enclosures. A model was developed to determine the relationship between the required air flow rate and the permissible temperature rise for the TM-1000/10 transformer.

It was established that with a small allowable temperature rise (2–5 °C), the required air flow rate exceeds 10,000 m³/h, which may be challenging to implement in practice. In the range of 10–15 °C, the air flow rate decreases to 3,000–4,000 m³/h, which is typical for natural or forced ventilation systems.

Keywords: power transformer, concrete shelter, fire safety, electrical safety, ventilation, thermal model, hybrid warfare