

Климась Р.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Ніжник В.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Несенюк Л.П.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Середа Д.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

ДО ПИТАНЬ ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ ПІД ЧАС ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ ПРИПИНЕННЯ ТА ПОШИРЕННЯ ГОРІННЯ СИСТЕМОЮ ВОГНЕПЕРЕШКОДЖАННЯ НА МАСЛОНАПОВНЕНИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЯХ

У статті розглянуто економічний ефект під час впровадження методу прогнозування припинення та поширення горіння трансформаторного масла залежно від параметрів гравійної засипки системи вогнеперешкодження трансформаторної підстанції, як основи вдосконалення конструктивних рішень під час проектування маслоприймачів трансформаторних підстанцій, що мають забезпечувати охолодження масла нижче температури спалаху. Одним з найбільш пожежонебезпечних видів обладнання на будь-якій електростанції є трансформатори, які можуть містити значну кількість мінерального масла, яке є горючою речовиною. Масло у таких установках використовується у якості охолоджувача, тобто в аварійних випадках може призвести до перегріву масла, що у свою чергу призводить до його кипіння, підвищення тиску та може спричинити руйнування корпусу трансформатора із аварійним розливом масла з подальшим його займанням. Розливання киплячого трансформаторного масла та його горіння сприяє подальшому розвитку пожежі та спричиняє її поширення територією підприємства та на суміжні об'єкти, що у свою чергу призводить до значних фінансових втрат. Припинення й обмеження поширення горіння трансформаторного масла досягається використанням системи вогнеперешкодження із застосуванням гравійної засипки по всій площі технологічного майданчика, що є економічно затратним і складним у реалізації. Запропоноване зменшення геометричних розмірів гравійної засипки в маслоприймачі дозволить зменшити експлуатаційні витрати на технічне обслуговування трансформаторної підстанції при збереженні належного рівня пожежної безпеки. У ході досліджень, направлених на збільшення економічного ефекту, розроблено методичну базу, направлену на обґрунтування для створення нормативно-правового забезпечення щодо визначення мінімальних параметрів гравійної засипки маслоприймача, як наслідок сформульовано пропозиції щодо внесення змін до Правил улаштування електроустановок. Зокрема пропонується визначений ухил дна маслоприймача та вимоги щодо матеріалу засипки та висоти гравійної засипки.

Ключові слова: гравійна засипка, маслонаповнені трансформатори, маслоприймач, охолодження масла, припинення горіння, трансформаторна підстанція, економічна ефективність.

Постановка проблеми. Аналіз інформаційно-аналітичних матеріалів Міністерства енергетики України за останні п'ять років вказує, що кожного року близько половини пожеж виникає на підприємствах електричних мереж. Статистичні дані про пожежі свідчать, що 56 % пожеж в енергетичній галузі припадає на трансформаторне обладнання; як правило, такі пожежі супроводжуються аварійним розливом масла із трансформатора та його

загорянням, що становлять значні матеріальні збитки для економіки як в цілому для держави, та і окремих господарств.

Трансформатори, як один із найбільш пожежонебезпечних видів обладнання на будь-якій електростанції, можуть містити від 200 л до 60 000 л мінерального масла, що є горючою речовиною із густиною в діапазоні $(0,80-0,89) \cdot 10^3$ кг/м³. Масло у таких установках використовується у якості охолоджувача,

тобто у випадку аварійної ситуації або порушення регламенту технологічного процесу може виникнути перегрівання масла до температури більше 250°C , що призводить до його кипіння, підвищення тиску та може спричинити руйнування корпусу трансформатора із аварійним розливом масла з подальшим його займанням. Розливання киплячого трансформаторного масла та його горіння сприяє подальшому розвитку пожежі та спричиняє її поширення територією підприємства та на суміжні об'єкти, що у свою чергу призводить до значних фінансових втрат.

Припинення й обмеження поширення горіння трансформаторного масла досягається застосуванням системи вогнеперешкоджання, що складається з маслоприймача, масловідводів і вогнезагороджувача, в якості якого використовується маслосбірник із металевою решіткою, поверх якої улаштовано гравійну засипку.

Найбільш поширеним і застосовуваним на практиці унормованим заходом щодо попередження розвитку таких пожеж є встановлення маслонеповнених трансформаторів у маслоприймачі з гравійною засипкою по всій площі технологічного майданчику, що на сьогоднішній день немає відповідного наукового обґрунтування, та, як наслідок, є економічно затратним і складним у реалізації. Це встановлює необхідність наукового обґрунтування оптимальних параметрів гравійної засипки маслоприймачів, як підґрунтя для припинення горіння трансформаторного масла та його охолодження нижче температури спалаху з метою мінімізації фінансово-економічних витрат.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблеми надійності потужних силових трансформаторів розглянуто у роботах Соколова В.В. [1]. Над підвищенням надійності трансформаторів на АЕС України працює Зозуля Д.В., зокрема, дослідження їх аварійності [2] дозволили визначити «зони ризику» обладнання та запропонувати діагностичні методи контролю терміну служби трансформаторного обладнання.

Дослідження надійності силових трансформаторів і наслідків аварійних ситуацій, пов'язаних із вибухами силових трансформаторів, висвітлено у працях Н. Berg і N. Fritze [3, 4], які відзначають, що останніми роками ймовірність відмов трансформаторів зростає через їх старіння чи зовнішні небезпеки. Запобіганням розривів резервуарів силових трансформаторів присвячена доповідь М. Foata і J.-В. Dastous [5].

Питанням прогнозування строку служби та ресурсу ізоляції присвячені праці Полякова М.А. та Василевського В.В. [6, 7].

З урахуванням викладеного, проведення досліджень, спрямованих на розкриття закономірностей зниження температури трансформаторного масла від параметрів гравійної засипки маслоприймача, стане підґрунтям для підвищення ефективності системи вогнеперешкоджання маслонеповнених трансформаторних підстанцій в умовах пожежі, що є актуальним науковим завданням з точки зору підвищення безпеки держави.

Мета роботи полягає у виявленні економічного ефекту шляхом охолодження та припинення горіння трансформаторного масла залежно від параметрів гравійної засипки системи вогнеперешкоджання трансформаторної підстанції, як основи вдосконалення наявних конструктивних рішень під час проектування маслоприймачів трансформаторних підстанцій, що мають виконувати функцію припинення горіння та забезпечувати охолодження масла нижче температури спалаху.

Виклад основного матеріалу. Оцінювання економічного ефекту від запропонованих параметричних рішень порівняно з існуючими підходами проведено для міста Києва із офіційною кількістю абонентів станом на 2018 рік в 1,16 млн відповідно до даних [8].

Відповідно до цих даних загальна кількість трансформаторних підстанцій (K_T) становить 3569 од., при цьому забезпечує їх обслуговування ($K_{\text{п}}$) 3116 осіб із числа технічного персоналу із середньою заробітною платою (ЗП) 14,900 грн на особу/місяць (745 грн/роб. день). Тобто на одну трансформаторну підстанцію в середньому приходиться (K_C) 1,15 працівника, із числа технічного персоналу на рік.

Відповідно до вимог [9] зміна гравійної засипки або її промивка відбувається один раз на рік. Слід розуміти, що відповідно до встановлених вимог роботи з промивки гравійної засипки неможливо проводити безпосередньо на трансформаторному майданчику. Під час організації проведення робіт з промивки гравійної засипки її повністю вилучають та вивозять на спеціальні промивні площадки для подальшого промивання, висушування та транспортування назад для заповнення маслоприймачів. Загальна тривалість такої роботи становить 7 днів, із якої 2 дні є трудовими ($T_{\text{роб}}$) та безпосередньо займають на здійснення процесу транспортування та промивки, а 5 днів – сушіння на відкритій площадці.

Проведемо порівняльний аналіз доцільності здійснення промивки гравійної засипки ($G_{\text{промивки}}$) або її повного вилучення та засипки нової гравійної засипки ($G_{\text{заміни}}$) за допомогою виразів (1) та (2):

$$G_{\text{промивки}} = K_c \cdot T_{\text{роб}} \cdot 3П + (E_T + E_B + E_H) \cdot 116, \quad (1)$$

де: K_c – середня кількість працівників залучених в рік (1,15);

Троб – кількість робочих днів (2);

3П – середня заробітна палата за один робочий день (745 грн);

E_T – затрати на транспортування 1 т вантажу на 1 км (170 грн);

E_B – затрати на подачу та відведення води промивки 1 т щебеню (35 грн);

E_H – витрати на експлуатацію насосного обладнання промивки 1 т щебеню (12 грн).

Таким чином $G_{\text{промивки}}$ для однієї трансформаторної підстанції становить 26885,5 грн на рік. Витратами на вилучення та засипання гравійної засипки в даному випадку можна знехтувати, враховуючи, що даний тип роботи присутній для обох типів експлуатації трансформаторів маслоприймачів.

Проведемо розрахунки вартості повного вилучення та засипки нової гравійної засипки ($G_{\text{заміни}}$):

$$G_{\text{заміни}} = K_c \cdot T_{\text{роб}} \cdot 3П + (E_T + E_y + E_{ГЗ}) \cdot 116, \quad (2)$$

де: E_y – затрати на утилізацію 1 т забрудненого щебеню (20 грн/т);

$E_{ГЗ}$ – затрати на закупівлю нової гравійної засипки (305 грн/т).

Таким чином $G_{\text{промивки}}$ для однієї трансформаторної підстанції становить 59133,5 грн на рік.

За результатом проведених розрахунків за формулами (1) та (2) визначено, що щорічні витрати на експлуатаційне обслуговування одного маслоприймача

трансформаторних підстанцій складає 26885,5 грн на рік – у разі промивки щебеню, та 59133,5 грн на рік – у разі повної заміни гравійної засипки.

Таким чином, загальні експлуатаційні витрати для всіх трансформаторів у місті Києві у разі промивки щебеню можна виразити рівнянням (3):

$$\sum E = K_T \cdot G_{\text{промивки}}, \quad (3)$$

Загальні експлуатаційні витрати для всіх трансформаторів у місті Києві у разі заміни щебеню можна виразити рівнянням (4):

$$\sum E = K_T \cdot G_{\text{заміни}}, \quad (4)$$

Тобто загальні експлуатаційні витрати для всіх трансформаторів у місті в разі промивки щебеню складатимуть 95 954 349,5 грн, а загальні експлуатаційні витрати для всіх трансформаторів у місті Києві у разі заміни щебеню складатимуть 211 047 461,5 грн, тобто промивання гравійної засипки є на 45 % вигіднішим, ніж його заміна на новий.

Візуально зменшення кількості щебеню зображено на рисунку 1.

Маса гравійної засипки, що використовується для заповнення однієї площадки за нормованими параметрами в середньому становить 86,4 м³ або 116 т.

Маса гравійної засипки, що використовується для заповнення однієї площадки за розрахованими параметрами в середньому становить 5,4 м³ або 7 т.

Із урахуванням отриманих нових параметрів гравійної засипки маслоприймачів та відповідно зміни її кількості з 116 тон до 7 тон проведемо аналогічні розрахунки за формулами (1) та (2)

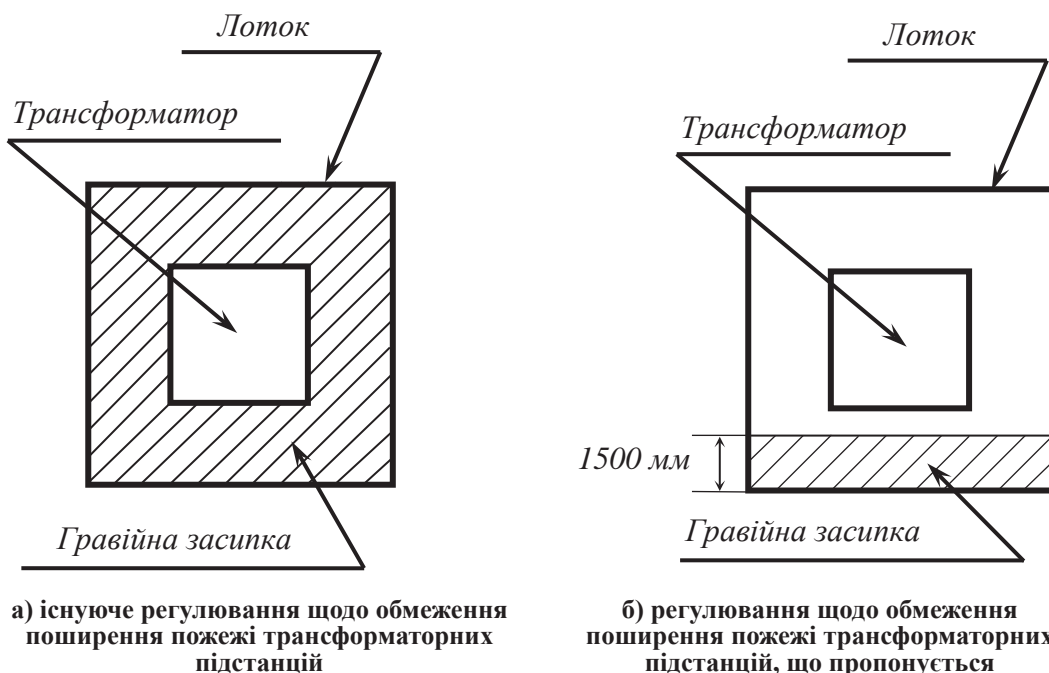


Рис. 1. Схеми маслонаповнених трансформаторних підстанцій із гравійною засипкою

та визначимо, що вартість промивки 1 т щебеню $G_{\text{промивки}}$ складатиме 3232,5 грн, а вартість заміни $G_{\text{заміни}}$ – 4478,5 грн. Таким чином, економічний ефект від зміни параметрів гравійної засипки одного маслоприймача на прикладі трансформаторних підстанцій міста складатиме до 72 %.

Зменшення геометричних розмірів гравійної засипки в маслоприймачі зменшує експлуатаційні витрати на технічне обслуговування трансформаторної підстанції при збереженні рівня пожежної безпеки. В Україні вимоги щодо непоширення пожежі під час аварій на маслоснаповнених трансформаторних підстанціях наведені у Правилах улаштування електроустановок [9], а саме зазначено, що на території відкритих розподільчих установок і підстанцій, на яких у нормальних умовах експлуатації із маслоснаповнених силових трансформаторів і вимикачів у період проведення ремонтних та інших робіт можуть траплятися випадки витікання масла, потрібно передбачати пристрої для збирання і видалення масла для унеможливлення розтікання його по території і попадання у водойми.

Підпунктом 4.2.67 [9] передбачено, що для запобігання розтіканню масла і поширенню пожежі під час пошкодження маслоснаповнених силових трансформаторів (шунтувальних реакторів) з кількістю масла понад 1 т в одиниці (в одному баку) потрібно застосовувати маслоприймачі з відведенням масла масловідводами в маслосбірники. Для трансформаторів (реакторів) потужністю до 10 МВ·А і маслоснаповнених бакових вимикачів на напругу 110 кВ і вище дозволено виконувати маслоприймачі без відведення масла.

Маслоприймачі з відведенням масла може бути виконано як заглибленого типу (дно – нижче рівня навколишнього планування землі), так і незаглибленого типу (дно – на рівні навколишнього планування землі). Незаглиблений маслоприймач потрібно виконувати у вигляді бортових огорож маслоснаповненого електроустановки. Висота бортових огорож повинна бути не менше ніж 0,25 м і не більше ніж 0,5 м над рівнем навколишнього планування землі. У разі виконання заглибленого маслоприймача облаштування бортових огорож дозволено не виконувати. Дно маслоприймача (заглибленого і незаглибленого) повинне мати ухил, не менше ніж 0,005, у бік приямка і бути засипаним чистим гравієм чи промитим гранітним щебенем або непористим щебенем іншої породи з частками розміром від 30 мм до 70 мм. Товщина засипки повинна бути не менше ніж 0,25 м. Верхній рівень гравію (щебеню) повинен

бути не менше ніж на 7,5 см нижче від верхнього краю борта (у разі улаштування маслоприймачів з бортовими огороженнями) або рівня навколишнього планування (у разі улаштування маслоприймачів без бортових огорожень). Дозволено не засипати дно маслоприймачів по всій площі гравієм. У цьому разі на системах відведення масла від трансформаторів (реакторів) потрібно передбачати установлення вогнезагороджувачів.

Маслоприймачі без відведення масла в маслосбірник потрібно виконувати заглибленої конструкції з металевою решіткою, поверх якої потрібно насипати шар чистого гравію, промитого гранітного щебеню або непористого щебеню іншої породи з частками розміром від 30 мм до 70 мм товщиною, не менше ніж 0,25 м. Крім того потрібно передбачати пристрої для видалення масла і води з маслоприймачів і контролю наявності масла і води в маслоприймачі.

Облаштування маслоприймачів і масловідводів повинне унеможливити витікання масла чи маслоснаповненої емульсії з одного маслоприймача в інший, розтікання масла по кабельних та інших підземних спорудах, поширення пожежі, засмічення масло відводу і забивання його снігом, льодом тощо. Масловідводи повинні забезпечувати відведення з маслоприймача масла і води, застосовуваної для гасіння пожежі автоматичними стаціонарними установками, в об'ємі 50 % масла і повного об'єму води за час, не більший ніж 15 хв на безпечну в пожежному відношенні відстань від устаткування і споруд (але не меншу ніж 10 м). Масловідводи дозволено виконувати у вигляді підземних трубопроводів або відкритих кюветів і лотків.

Проведені теоретичні та експериментальні наукові дослідження в даній роботі [10, 11, 12] виявили можливість зміни умов розміщення гравійної засипки та її геометричних параметрів без зміни розміру фракції гравійної засипки та конструкції маслоприймача.

При цьому необхідно дотримуватися таких умов:

- дно маслоприймача, що засипається повинне мати ухил, не менше ніж 0,05 м/м, у бік приямка та бути засипаним чистим гравієм чи промитим гранітним щебенем або непористим щебенем іншої породи з частками розміром від 30 мм до 70 мм;

- висота гравійної засипки повинна бути не менше ніж 0,25 м, а ширина не менше ніж 1,5 м.

Підшириною гравійної засипки слід вважати відстань від краю сітки масловідводу до краю гравійної засипки. Гравійна засипка заданих параметрів

улаштовується по всій довжині сітки масловідводу до потрапляння масла в маслосбірник для аварійного зливу.

За результатами проведених досліджень розроблено методичну базу, що є підґрунтям для створення нормативного забезпечення щодо визначення мінімальних параметрів гравійної засипки маслоприймача.

У результаті чого сформульовано пропозиції щодо внесення змін до Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), а саме: вважаємо за доцільне дев'ятий абзац п. 4.2.67 [9] викласти в такій редакції:

«Дно маслоприймача (заглибленого і незаглибленого) повинне мати ухил, не менше ніж 0,05 м/м, у бік приямка і бути засипаним чистим гравієм чи промитим гранітним щебенем або непористим щебенем іншої породи з частками розміром від 30 мм до 70 мм. При цьому, висота гравійної засипки повинна бути не менше ніж 0,25 м, а ширина не менше ніж 1,5 м. Під шириною гравійної засипки слід вважати відстань

від краю сітки масловідводу до краю гравійної засипки. Гравійна засипка заданих параметрів улаштовується по всій довжині сітки масловідводу до потрапляння масла в маслосбірник для аварійного зливу».

Висновки. Економічний ефект від запропонованих технічних рішень порівняно з існуючими підходами за розрахунком техніко-економічного обґрунтування параметрів гравійної засипки у маслоприймачах маслонаповнених трансформаторних підстанцій на прикладі довготривалої експлуатації для міста Києва, з урахуванням зменшення кількості щебеню й експлуатаційних витрат, складає до 72 %.

На основі отриманих результатів досліджень розроблено методичну базу, що є підґрунтям для створення нормативного забезпечення щодо визначення мінімальних параметрів гравійної засипки маслоприймача. У результаті чого сформульовано пропозиції щодо внесення змін до Правил улаштування електроустановок (ПУЕ).

Список літератури:

1. Соколов В.В. Проблеми надійності потужних трансформаторів після тривалої експлуатації. Трансформаторобудування: Тези доповідей XI міжнародної наук.-техн. конф. Запоріжжя: ПАТ ВІТ, 2005. С. 12-15.
2. Зозуля Д.В. Розробка та наукове обґрунтування технічних пропозицій щодо підвищення надійності, енергетичної ефективності та продовження ресурсу трансформаторів ТНЦ-1250000/330 на блоках АЕС України. Збірник: Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. Чорнобиль: вип. 20, 2013. С. 57-67.
3. Heinz-Peter Berg, Nicole Fritze Reliability and vulnerability of transformers for electricity transmission and distribution. Journal of Polish Safety and Reliability Association Summer Safety and Reliability Seminars. Vol. 6, № 3, 2015. Pp. 15-24.
4. Heinz-Peter Berg, Nicole Fritze Risk and Consequences of Transformer Explosions and Fires in Nuclear Power Plants. Journal of KONBiN. Warszawa: No. 3 (23), 2012. Pp. 5-16. DOI: <https://doi.org/10.2478/jok-2013-0034>.
5. Marc Foata, Jean-Bernard Dastous Power Transformers Tank Rupture Prevention, CIGRÉ Session. Paris, 2010.
6. Поляков М.А., Василевський В.В. Оцінка залишкового ресурсу ізоляції з урахуванням обліку індивідуальних особливостей життєвого циклу силового трансформатора. Електротехніка і електромеханіка. Харків: № 3, 2014. С. 33-36.
7. Поляков М.А., Андріяс І.С., Конограй С.П., Василевський В.В. Когнітивне керування життєвим циклом ізоляції обмоток маслонаповненого силового трансформатора. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. Харків: № 5 (1281), 2018 С. 90-96.
8. План розвитку електричних мереж оператора системи розподілу ПРАТ «ДТЕК Київські електромережі» на 2020-2024 роки / технічний звіт, 2019. 208 с.
9. Правила улаштування електроустановок. К.: Міненерговугілля України, 2017. 617 с.
10. Klymas R., Nizhnyk V., Nekora O., Nekora V., Stylyk I. Justification of minimum parameters of gravel backfill of the oil receiver of the transformer substation [Обґрунтування мінімальних параметрів гравійної засипки маслоприймача трансформаторної підстанції]. The Scientific heritage. Budapest, Hungary: vol. 1, № 79 (79), 2021. Pp. 36-44. DOI: <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-79-1-36-44>.
11. Климаць Р.В., Ніжник В.В., Балло Я.В., Хроменков Д.Г., Гулик Ю.Б., Ільченко Н.М. Методика експериментальних досліджень обґрунтування мінімальних геометричних параметрів гравійної засипки у маслоприймачі трансформаторної підстанції. Науково-технічний збірник: Комунальне господарство міст. Серія: технічні науки та архітектура. Харків: т. 4, вип. 164, 2021. С. 158-165. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-4-164-158-165>.
12. IEC 60296:2003 Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear [міжнародний стандарт: Рідини для застосування в електротехніці. Невикористані нафтові ізоляційні масла для трансформаторів і вимикачів]. Edition 3.0, 2003-11. IEC, 2003. 23 p.

Klymas R.V., Nizhnyk V.V., Nesenyuk L.P., Sereda D.V. ON THE ISSUES OF THE ECONOMIC EFFECT DURING THE IMPLEMENTATION OF THE METHOD FOR PREDICTING THE STOPPING AND SPREAD OF THE FIRE PREVENTION SYSTEM AT OIL-FILLED TRANSFORMER SUBSTATIONS

The article considers the economic effect during the implementation of the method of predicting the termination and spread of transformer oil burning depending on the parameters of the gravel backfill of the fire protection system of the transformer substation, as a basis for improving constructive solutions during the design of oil receivers of transformer substations, which should ensure oil cooling below the flash point. One of the most fire-hazardous types of equipment in any electrical substation are transformers, which can contain significant amounts of mineral oil, which is a combustible substance. Oil in such installations is used as a coolant, that is, in emergency cases, it can lead to overheating of the oil, which in turn leads to its boiling, increased pressure, and can cause the destruction of the transformer housing with an emergency spill of oil, followed by its ignition. Spilling of boiling transformer oil and its burning contributes to the further development of the fire and causes it to spread throughout the territory of the enterprise and to adjacent objects, which in turn leads to significant financial losses. Stopping and limiting the spread of burning transformer oil is achieved by using a fire prevention system with the use of gravel filling over the entire area of the technological site, which is economically costly and difficult to implement. The proposed reduction of the geometric dimensions of the gravel filling in the oil receiver will allow to reduce the operating costs for maintenance of the transformer substation while maintaining the appropriate level of fire safety. In the course of research aimed at increasing the economic effect, a methodological base was developed, aimed at substantiation for the creation of legal support for determining the minimum parameters of the gravel filling of the oil receiver, as a result, proposals were formulated for making changes to the Rules for the arrangement of electrical installations. In particular, a defined slope of the bottom of the oil receiver and requirements for the backfill material and the height of the gravel backfill are proposed.

Key words: gravel backfill, oil-filled transformers, oil receiver, oil cooling, cessation of combustion, transformer equipment, economic efficiency.