



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра електричних станцій і систем

## Дослідження систем охолодження силових трансформаторів



Доповідач:

ст.гр. ЕС-17м  
*Бардильов О.А.*

Науковий керівник : к.т.н., ст. викл.  
*Гулько І. О.*

# Актуальність роботи

Енергетика нашої країни характеризується переходом від державної до приватної форми власності, що в свою чергу викликає появу нових задач та проблем. Однією з таких проблем є експлуатація застарілого обладнання, що відпрацювало паспортний ресурс, а тому фізично застаріло. Серед такого обладнання велику частку займають силові трансформатори.

За результатами аналізу пошкоджуваності силових трансформаторів, який проводився всеукраїнською галузевою газетою «Електротема», можна зробити висновки, що трансформатори потужністю понад 80 МВА, які експлуатуються в наш час і виготовлені заводами країн СНД, становлять близько 5500, а середня кількість аварій на таких трансформаторах – до 15 в рік. Основна частина аварійних відмов – це трансформатори з напрацюванням понад 20 років, а 28 % – з напрацюванням понад 30 років. Вихід з роботи силового трансформатора призводить до збитків та погіршує умови оптимальної роботи електричних систем.

Аналіз літературних джерел свідчить про те, що причинами виведення силових трансформаторів з експлуатації стають: пошкодження систем охолодження та високовольтних ввідів, понад нормований вміст розчинених в маслі газів, старіння масла, дефекти в пристроях РПН і т.п.

## Мета і задачі дослідження

Метою магістерської роботи є дослідження систем охолодження силових трансформаторів.

Задачі досліджень:

дослідження конструктивних особливостей силових трансформаторів;

аналіз систем охолодження СТ;

дослідження нормативної документації до нагріву силових трансформаторів;

проведення теплового розрахунку силового трансформатора;

проведення теплового розрахунку обмоток та баку трансформатора;

дослідження впливу режимів навантаження що перевищує номінальний на технічний стан трансформатора;

визначення економічних показників впровадження систем діагностики силових трансформаторів;

дослідження заходів з безпечної експлуатації силових трансформаторів та забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях

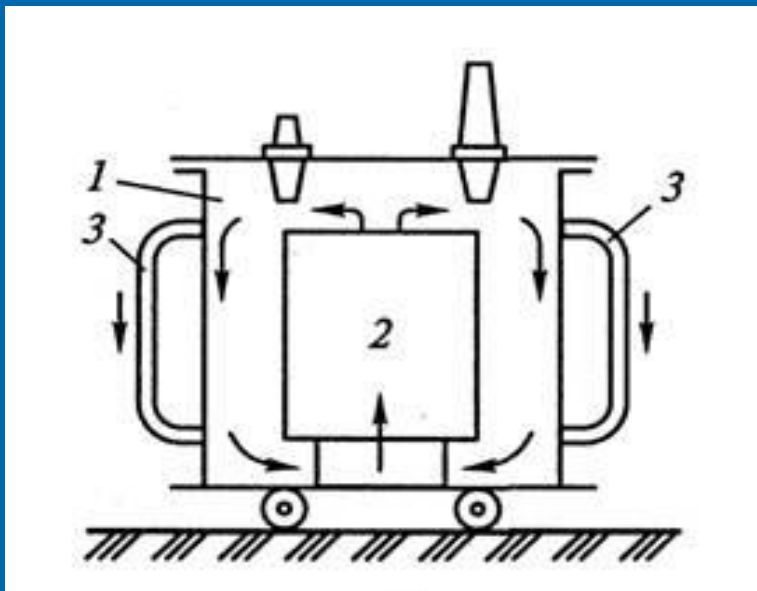


# Види системи охолодження силових трансформаторів:

Вид системи охолодження трансформаторів	Умовні позначення виду системи охолодження, прийняті в	
	Країнах СНГ	Закордонних країнах
Природна циркуляція повітря і масла	М	ONAN
Примусова циркуляція повітря і природна циркуляція масла	Д	ONAF
Природна циркуляція повітря і примусова циркуляція масла з ненаправленим потоком масла	МЦ	OFAN
Природна циркуляція повітря і примусова циркуляція масла з направленим потоком масла	НМЦ	ODAN
Примусова циркуляція повітря і масла з ненаправленим потоком масла	ДЦ	OFAF
Примусова циркуляція повітря і масла з направленим потоком масла	НДЦ	ODAF
Примусова циркуляція води і масла з ненаправленим потоком масла	Ц	OFWF
Примусова циркуляція води і масла з направленим потоком масла	НЦ	ODWF

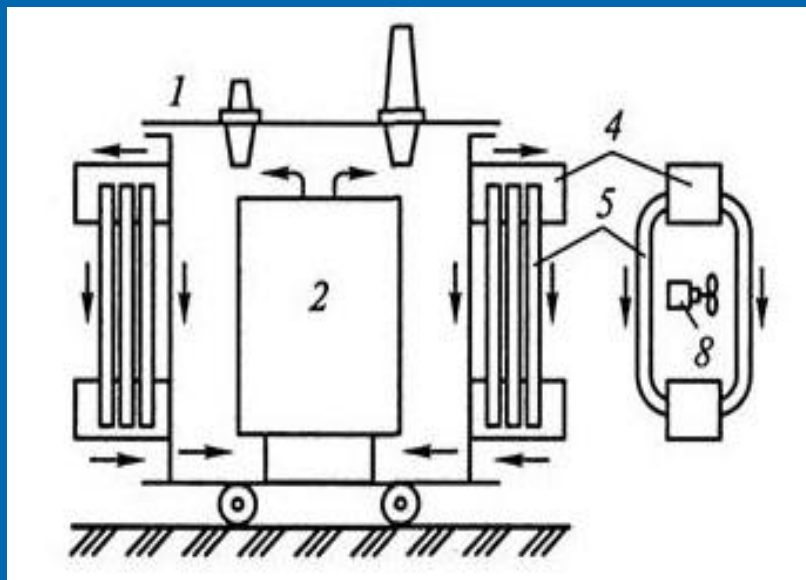
# Силовий трансформатор з типом охолодження М

5



Система охолодження М передбачає природну циркуляцію масла в баку трансформатора. Тепло масла передається баку трансформатора, який охолоджується навколишнім повітрям. Дана система охолодження не передбачає примусової циркуляції повітря. Використовується на силових трансформаторах номінальною потужністю до 16 МВА

# Силовий трансформатор з типом охолодження Д

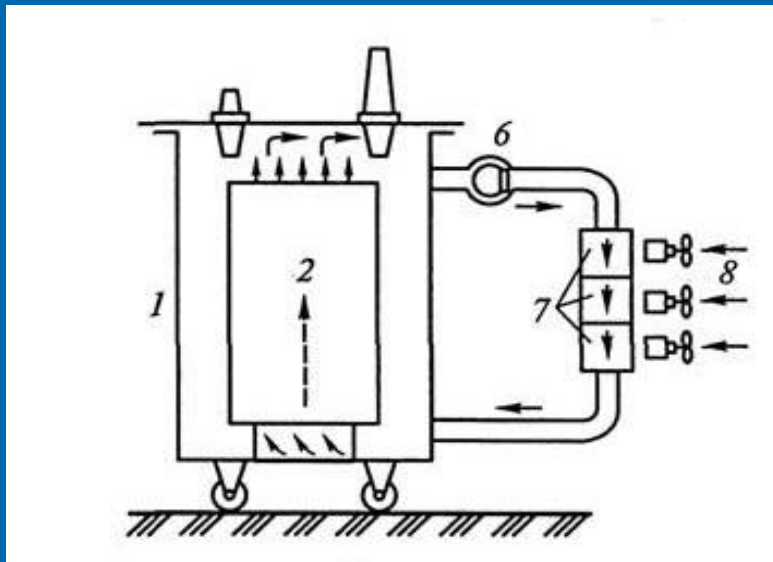


Система охолодження трансформатора Д — з дуттям і природною циркуляцією масла. Трансформатори даної системи охолодження конструктивно мають вентилятори обдуву, що встановлюються в навісні радіатори, по яких циркулює трансформаторне масло. Обдув включається при досягненні температури верхнього шару трансформаторного масла 55 і більше градусів Цельсія, або при досягненні номінального навантаження трансформатора, не залежно від температури масла. Використовується даний тип охолодження для трансформаторів номінальною потужністю 16—80 МВА.



# Силовий трансформатор з типом охолодження ДЦ

7



Система охолодження ДЦ відрізняється від системи Д наявністю примусової циркуляції масла. Вентилятори обдування, як і в системі Д охолоджують радіаторні труби. В радіаторних трубах безперервно циркулює трансформаторне масло, яке перекачується електричними насосами, вбудованими в маслопроводи бака трансформатора. Швидка циркуляція масла по радіаторах і їх обдування забезпечують високу тепловіддачу. Завдяки даній системі охолодження значно знижені габарити силового трансформатора і збільшена їх номінальна потужність до меж 63—160 МВА.

# ПРИКЛАДИ ПОШКОДЖЕНЬ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ СТ



**Забруднення системи  
охолодження  
трансформаторним маслом**

**Забруднення  
охолоджувачів  
листям і травою**



**Витікання масла**





# Розрахунок параметрів охолодження масла СТ

9.1

Вхідні данні: тепловий потік охолоджувача  $P=100\ 000$  Вт; температура масла на вході в охолоджувач  $= 70\ ^\circ\text{C}$ ; на виході  $= 65\ ^\circ\text{C}$ ; при середній температурі масла  $67,5\ ^\circ\text{C}$  його питома теплоємність рівна  $2050$  (Дж/(кг  $^\circ\text{C}$ )) і щільність  $\rho = 853,5$  (кг/м $^3$ ).

$$\Delta\vartheta = 70 - 65 = 5^\circ\text{C} \quad 9.1 \quad \text{Осьовий перепад температури}$$

$$G = \frac{P}{c\Delta\vartheta} = \frac{100000}{2050 \cdot 5} = 9.75 \quad 9.2 \quad \text{Масова витрата масла в охолоджувачі (кг/с)}$$

$$F = \frac{G}{\rho} = \frac{9.75}{853.5} = 0.01142 \quad 9.3 \quad \text{Об'ємна витрата масла в охолоджувачі (м $^3$ /с)}$$

$$A_1' = \frac{\pi \cdot 10^2}{4} - 0.3 \cdot 10 - 1.5 = 74 \cdot 10^{-6} \text{ (м $^2$ )} \quad 9.4 \quad \text{Площа вільного перетину труби при внутрішньому діаметрі } d=10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\omega_0 = \frac{F}{A_1} = \frac{0.01142}{135 \cdot 74 \cdot 10^{-6}} = 1.142 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right) \quad 9.5 \quad \text{Швидкість масла в трубах}$$

# Розрахунок параметрів охолодження масла СТ

9.2

Коефіцієнт тепловіддачі з боку масла

$$d_h = \frac{4f}{\pi} = \frac{2 \cdot 74}{0.5\pi \cdot 10 + 10} = 5.77 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}$$

9.6

Гідравлічний діаметр D-образної частини перетину труби

$$\vartheta_m = 67.5 - 0.5 \cdot 10 = 62.5 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

9.7

Середня температура прикордонного шару масла

$$\text{Re}_m = \frac{1.142 \cdot 5.77 \cdot 10^{-3}}{6.55 \cdot 10^{-6}} = 1008$$

9.8

Число Рейнольдса для масла

$$\text{Nu}_m = 0.74 \cdot 1008^{0.2} (347 \cdot 88.3)^{0.1} \cdot 88.3^{0.2} = 20.2$$

9.9

Число Нуссельта при горизонтальному розташуванні труб

$$\alpha_1 = \text{Nu}_m \frac{\lambda}{d_k} = 20.2 \frac{0.12815}{5.77 \cdot 10^{-3}} = 477$$

9.10

Коефіцієнт тепловіддачі масла

# Розрахунок параметрів охолодження масла СТ

## Розрахунки для сторони повітря

$$F_l = \omega_l A_2 = 3.2 \frac{1.7}{2} = 2.72 \quad 9.11 \quad \text{Об'ємна витрата повітря (м³/с)}$$

$$G_l = F_l \rho_l = 2.72 \cdot 1.056 = 2.875 \quad 9.12 \quad \text{Масова витрата повітря (кг/с)}$$

$$\Delta \vartheta_l = \frac{P}{G_l c_p} = \frac{10000}{2.875 \cdot 1016} = 34.2^\circ \text{C} \quad 9.13 \quad \text{Осьовий перепад температури повітря в охолоджувачі}$$

$$\text{Re}_f = \frac{3.2 \cdot 0.0575}{18.6 \cdot 10^{-6}} = 9900 \quad 9.14 \quad \text{Число Рейнольдса для повітря}$$

$$\text{Nu}_f = 1.125 \cdot 9900^{0.545} \cdot 0.722^{\frac{2}{3}} = 136 \quad 9.15 \quad \text{Число Нуссельта для повітря}$$

$$\alpha_2 = \text{Nu}_f \frac{\lambda_l}{d_h} = 136 \frac{0.0272}{0.0575} = 64.3 \quad 9.16 \quad \text{Коефіцієнт тепловіддачі повітря}$$



# Розрахунок температури найбільш нагрітої точки обмотки СТ

Розрахунки  $\theta_h$  і  $V$  виконуються для добового двоступеневого прямокутного графіку навантаження трансформатора ТМН-6300/10 за початковими значеннями його параметрів

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_{bt} + H_{qr} K^y = 16.0 + 56.34 + 40.31 = 112.65 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

10.1 Найбільш нагріта точка обмотки СТ

$$\Delta\theta_{bt} = \Delta\theta_{bi} + (\Delta\theta_{bu} - \Delta\theta_{bi})(1 - e^{-t/\tau})$$

10.2 Температура масла в нижній частині бака в момент часу  $t$

$$\Delta\theta_{bu} = \Delta\theta_{or} \left[ \frac{1 + RK_2^2}{1 + R} \right]^x$$

10.3 Максимальна температура масла в нижній частині бака

$$\Delta\theta_{bi} = \Delta\theta_{or} \left[ \frac{1 + RK_1^2}{1 + R} \right]^x$$

10.4 Початкова температура масла в нижній частині бака

$$\Delta\theta_{bt} = 55 \left( \frac{1 + 5 \cdot 0.57^2}{1 + 5} \right)^{0.8} + \left[ \left( \frac{1 + 5 \cdot 1.42^2}{1 + 5} \right)^{0.8} - \left( \frac{1 + 5 \cdot 0.57^2}{1 + 5} \right)^{0.8} \right] (1 - e^{-2/3.0}) = 56.4$$

10.5 Температура в момент часу  $t$

$$\Delta\theta_{hk2} = H_{qr} \cdot K^y = 23 \cdot 1.42^{1.6} = 40.31 \text{ }^\circ\text{C}$$

10.6 Перевищення температури найбільш нагрітої точки

# Розрахунок відносного зношення виткової ізоляції

11

$$V_1 = \frac{\Delta t_1}{24} 2^{(\theta_{h1}-98)/6} = \frac{8}{24} 2^{(51.49-98)/6} = 0.00155$$

11.1 Відносне зношення виткової ізоляції за 8 год

$$V_2 = \frac{\Delta t_2}{24} 2^{(\theta_{h2}-98)/6} = \frac{1}{24} 2^{(92.7-98)/6} = 0.0226$$

11.2 Відносне зношення виткової ізоляції за 1 год

$$V_3 = \frac{\Delta t_3}{24} 2^{(\theta_{h3}-98)/6} = \frac{1}{24} 2^{(107-98)/6} = 0.118$$

11.3 Відносне зношення виткової ізоляції за 1 год

$$V_4 = \frac{\Delta t_4}{24} 2^{(\theta_{h4}-98)/6} = \frac{1}{24} 2^{(78-98)/6} = 0.00413$$

11.4 Відносне зношення виткової ізоляції за 1 год

$$V_5 = \frac{\Delta t_5}{24} 2^{(\theta_{h5}-98)/6} = \frac{1}{24} 2^{(71.5-98)/6} = 0.00195$$

11.5 Відносне зношення виткової ізоляції за 1 год

$$V_6 = \frac{\Delta t_6}{24} 2^{(\theta_{h6}-98)/6} = \frac{3}{24} 2^{(63.4-98)/6} = 0.0023$$

11.6 Відносне зношення виткової ізоляції за 3 год

$$V_7 = \frac{\Delta t_7}{24} 2^{(\theta_{h7}-98)/6} = \frac{3}{24} 2^{(56.5-98)/6} = 0.00104$$

11.7 Відносне зношення виткової ізоляції за 3 год

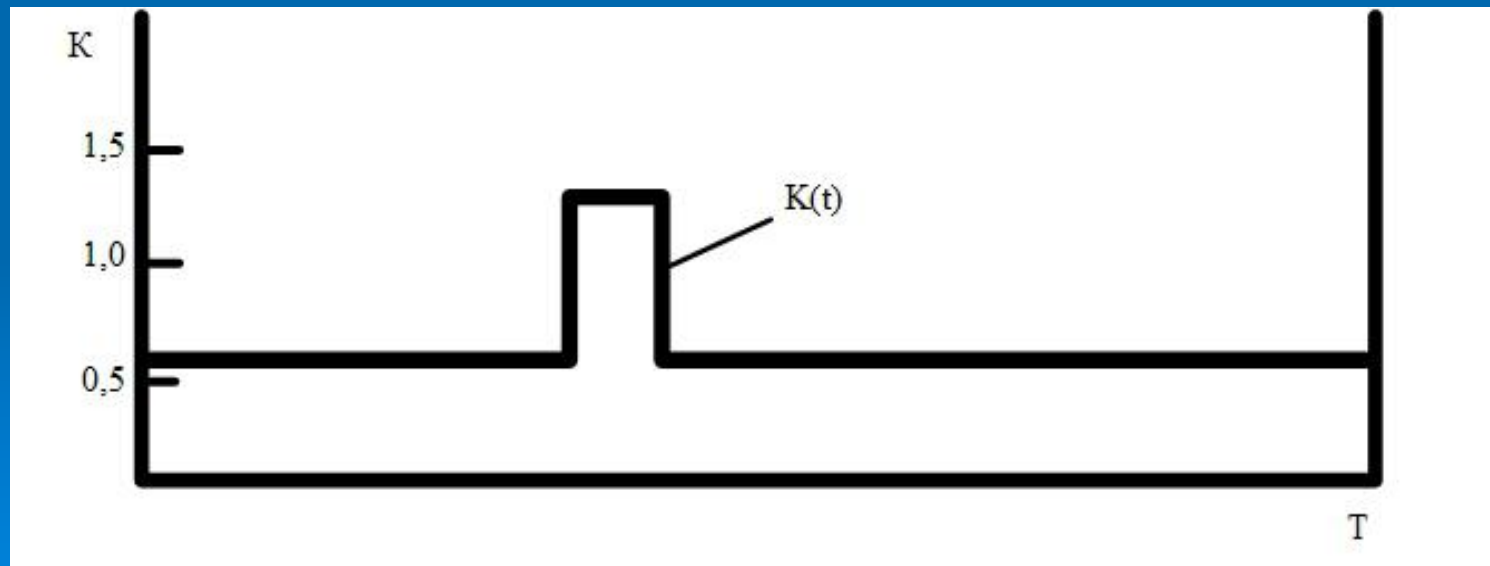
$$V_8 = \frac{\Delta t_8}{24} 2^{(\theta_{h8}-98)/6} = \frac{6}{24} 2^{(53-98)/6} = 0.00138$$

11.8 Відносне зношення виткової ізоляції за 6 год

# Відносне зношування виткової ізоляції за добу

$$V = \sum_{i=1}^{i=8} V_i = (0.00155 + 0.0226 + 0.118 + 0.00413 + 0.00195 + 0.0023 + 0.00104 + 0.00138) = 0.153$$

12.1

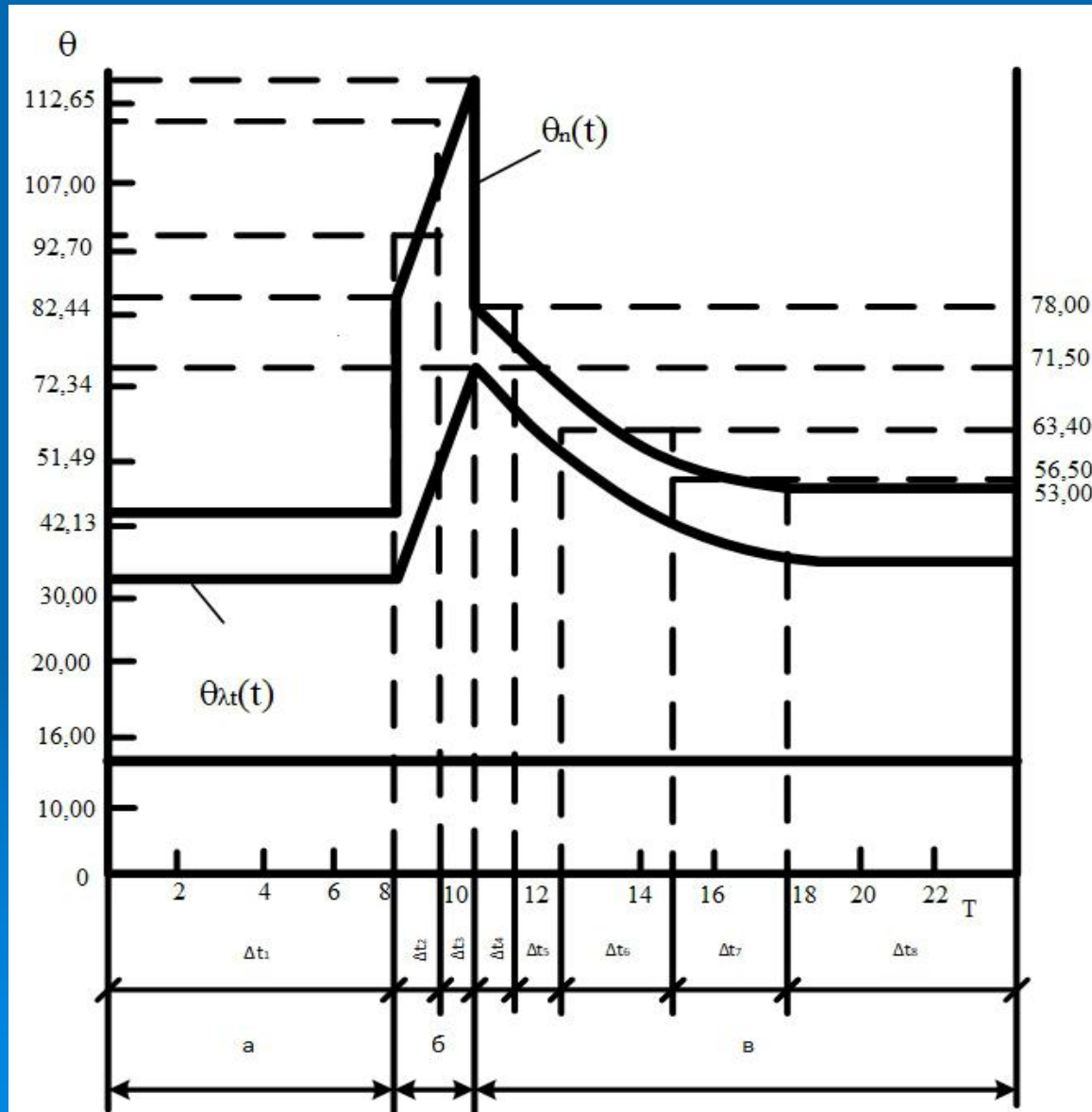


12.1 – добовий двоступінчатий прямокутний графік навантаження трансформатора ТМН-6300/10



# Добовий графік зміни температури трансформатора ТМН-6300/10

13



1. Результати дослідження конструктивних особливостей силових трансформаторів свідчать про те, що одним з основних елементів силового трансформатора є система охолодження
2. Аналіз систем охолодження СТ свідчить про те, що вибір систем охолодження залежить від потужності та класу напруги трансформатора, так наприклад на більшості трансформаторів та автотрансформаторів, які експлуатуються в ЕЕС України на напругу 330 кВ та потужністю 125 МВА і більше використовується система OFAF.
3. Проведенні дослідження нормативної документації свідчать про те, що максимально допустимі температури верхніх шарів трансформаторних масла зазначені в наступних джерелах ГОСТ 8865.
4. Аналізом та тепловими розрахунками підтверджено, що найбільш нагріта точка обмотки знаходиться у верхній зоні, де температура на 13 °С вище середньої температури обмотки.
5. Тепловий розрахунок обмоток і баку передбачає визначення коефіцієнтів тепловіддачі і перевищень середніх температур котушок над середньою температурою масла в баку на рівні обмотки. Ці формули мають вигляд статичних залежностей від геометричних розмірів котушок і від питомої теплового потоку з емпіричними коефіцієнтами і показниками ступеня.
6. Режим навантажень що перевищують номінальні значення призводять до того, що температура обмоток, відводів, ізоляції та оливи збільшуються і можуть досягти неприйнятної рівня, індукція магнітного потоку розсіювання збільшується, викликаючи збільшення вихрових струмів, що нагрівають металеві частини та ін.
7. Розрахунки проведені в економічній частині довели економічну ефективність впровадження діагностики систем охолодження силових трансформаторів. Впровадження методів та засобів оперативного визначення технічного стану системи охолодження силових трансформаторів дає можливість оперативному персоналу враховувати можливості цього обладнання і зменшити його пошкоджуваність.

**Доповідь закінчена**  
**Дякую за увагу**