

До питання вибору системи охолодження тягових трансформаторів підвищеної частоти

Вступ. Питання ресурсозбереження, енергоефективності та енергозбереження в промисловості, на транспорті та інших сферах у сучасних умовах мають велике значення [1,2,3 та інш.]. Одним зі шляхів вирішення цієї комплексної проблеми є використання електротехнічних систем та пристроїв підвищеної частоти [4,5 та інш.]. Це, як відомо, дозволить підвищити їх питому потужність, тобто зменшиться кількість дефіцитних матеріалів при збереженні тієї ж самої потужності. Але постає питання о можливості використання розроблених принципів та підходів до проектування існуючих систем забезпечення функціонування електротехнічних пристроїв до нових електротехнічних комплексів підвищеної частоти.

Мета роботи. Провести дослідження питання вибору системи охолодження тягових трансформаторів підвищеної частоти призначених для встановлення на багатосистемних електровозах.

Матеріал і результати досліджень. Більшість тягового рухомого складу, зокрема електровозів, що експлуатуються на залізницях України були спроектовані ще 60-ті, 70-ті роки 20 ст. та основані на використанні доступних на той час матеріалів та технологій [6,7 та інш.].

До складу сучасних багатосистемних та електровозів змінного струму входять однофазні тягові трансформатори, які характеризуються деякими особливостями у порівнянні з трансформаторами загальнопромислового виконання [7], а саме: індукція в магнітопроводі (сталь 3404-3405 лист 0,35 мм) не перевищує 1,5...1,55 Тл, що виключає можливість виникнення великих індукцій при підвищенні напруги у контактній мережі (діапазон змін напруги - 10%...+30%). Крім того, тягові трансформатори характеризуються мінімальним значенням втрат у сталі, що обумовлено частою роботою трансформатора з навантаженням менше номінального.

Втрати у холоднокатаній сталі при підвищеній частоті приблизно визначаються як:

$$\Delta p_{cm} \sim B^2 \left(\frac{f}{50} \right), \quad (1)$$

при базовій індукції 1,0 Тл та базовій частоті 50 Гц [8].

Таким чином збільшення частоти з 50 Гц до 1000 Гц, призведе до приблизного збільшення втрат холостого ходу (при однаковій індукції) в $\left(\frac{1000}{50} \right)^{1,5} = 20^{1,5} = 89,4$ рази. Таке збільшення неприпустиме.

Вирішити проблему підвищення робочих частот тягового трансформатора при збереженні або зменшенні втрат неробочого ходу, пропонується за рахунок

використання сучасних магнітних матеріалів.

Основним показником, який визначає доцільність використання магнітного матеріалу для побудови електромагнітного пристрою, є втрати у магнітопроводі, які складаються із втрат на гістерезис, вихрові струми й втрат внаслідок магнітної в'язкості (або магнітної післядії).

В праці [9] автори, на підставі обробки значної кількості статистичних даних, щодо втрат у магнітних матеріалах, отриманих для різних магнітних матеріалів, стверджують, що більш раціональним є метод визначення повних втрат (без поділення на складові) на підставі експериментальних даних, отриманих при синусоїдальному впливі.

Для визначення питомих втрат в сталюму магнітопроводі тягового трансформатора підвищеної частоти, використаємо наступне співвідношення [9]:

$$p' = \left(\frac{f}{f^*} \right)^\alpha \left(\frac{B_m}{B_m^*} \right)^\beta, \quad (2)$$

де: f - частота, Гц;

B_m - індукція, Тл;

$f^* = 1000$ Гц, $B_m^* = 1$ Тл – базові значення частоти та індукції.

Як бачимо в (2) у порівнянні з (1) в якості базової частоти прийнята 1000 Гц.

Позначивши:

$$p_{01} = p_0 (f^*)^{-\alpha} (B_m^*)^{-\beta}. \quad (3)$$

Отримаємо:

$$p_{01} = p_0 f^\alpha B_m^\beta, \quad (4)$$

де: p_0 , α , β - коефіцієнти, отримані після опрацювання експериментальних залежностей $p'(f, B_m)$ [9].

Враховуючи, що втрати у сталюх магнітопроводах при підвищених частотах визначаються втратами на вихрові струми, питому потужність втрат також можна визначити за наступним виразом:

$$p' = A f^{2/3} B_m^2, \quad (4)$$

де: A - коефіцієнт що показує втрати в одиниці об'єму, при частоті 1 Гц та індукції 1 Тл.

Діапазон потужностей який досліджується для трифазних трансформаторів слід збільшити також у три рази – від 1000 кВт до 15000 кВт.

Для визначення ефективності використання трифазних трансформаторів підвищеної частоти, у порівнянні з трансформаторами промислової частоти, на рис. 1 представлені, відносні до потужності, стандартні значення втрат неробочого ходу трансформаторів, магнітопровід яких зібрано з сталі марок 3404, 3405 або 3406 (товщина стрічки 0,27, 0,3 або 0,35 мм). Дані представлені для стандартного ряду потужностей та класів напруг 10 та 35 кВ [10]. Коефіцієнт потужності приймаємо приблизно $\cos \phi \approx 1$.

Як бачимо з рис. 1 використання для виготовлення магнітопроводу трифазного трансформатора підвищеної частоти сталі марки 3424 (0,08 мм) дозволяє зменшити втрати у магнітопроводі приблизно у три рази. Використання

сталей інших марок призведе до збільшення втрат у магнітопроводі, у порівнянні з трансформаторами промислової частоти, або ці втрати будуть приблизно однаковими (рис.1).

Потужність короткого замикання трифазного трансформатора підвищеної частоти, що розглядається, визначимо зі співвідношення [10]:

$$P_0 : P_K = 1 : (2,5 \dots 4), \quad (4)$$

де: P_0 – втрати неробочого ходу.

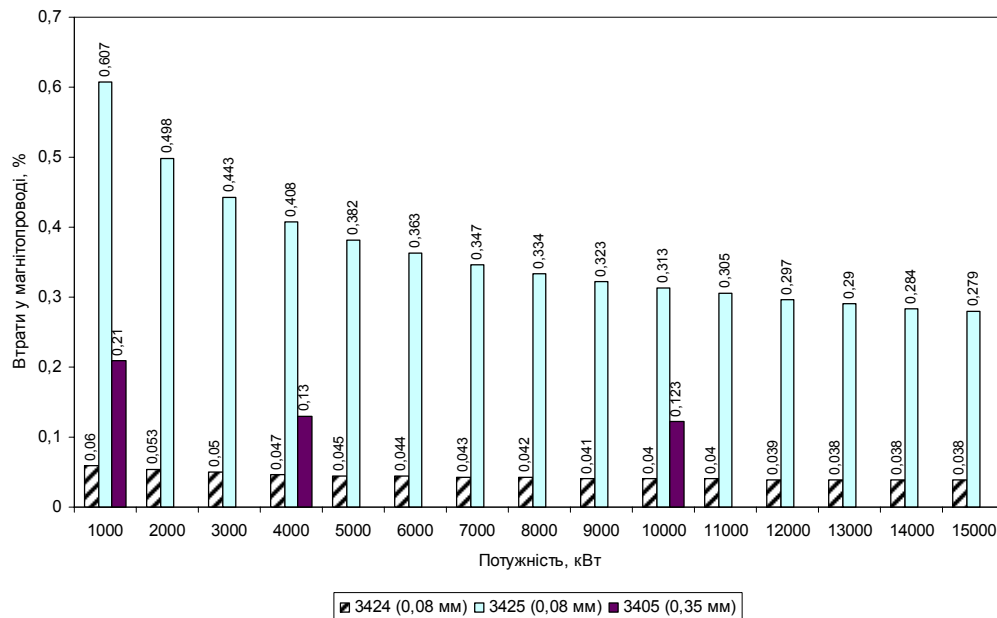


Рисунок 1 - Відносні втрати у магнітопроводі трифазного трансформатора підвищеної частоти з різних сталей в функції потужності.

Приймаючи середнє значення співвідношення втрат неробочого ходу та короткого замикання на рівні трьох, отримаємо:

$$P_K = 3P_0. \quad (4)$$

Опираючись на отримані раніш значення втрат P_0 представимо результати розрахунку потужності короткого замикання трансформаторів у табл. 1.

Приймаючи інші втрати у трансформаторі на рівні 10% від сумарних втрат неробочого ходу та короткого замикання розрахуємо, у першому наближенні, сумарні втрати потужності у трифазному тяговому трансформаторі підвищеної частоти (табл. 1).

Традиційно на тяговому рухомому складі використовується примусове рідинне охолодження, яке характеризується мінімальними масогабаритними показниками. Але представлені розрахунки показують, що втрати у трифазних трансформаторах підвищеної частоти майже в три рази нижче ніж в трансформаторах промислової частоти, тому є доцільним є провести орієнтовний тепловий розрахунок трансформатора, з метою обґрунтування вибору його системи охолодження.

Порівняємо між собою дві системи охолодження: масляну примусову та масляну природну.

За критерій попередньої приймаємо значення перепаду температури на поверхні обмотки [10].

Таблиця 1

Втрати короткого замикання трифазних трансформаторів
підвищеної частоти

Параметр	Потужність, кВт				
	1000	1600	2500	4000	6300
Втрати неробочого ходу P_0 , Вт	602	887	1283	1890	2750
Втрати короткого замикання P_k , Вт	1806	2661	3849	5670	8250
Приблизні сумарні втрати, Вт	2649	3903	5645	8316	12100

Перепад температури на поверхні обмотки визначається як [10]:

$$\Theta_{\text{по}} = k_1 k_2 k_3 \cdot 0,35 q^{0,6}, \quad (5)$$

де k_1 - коефіцієнт який враховує швидкість руху охолоджуючої рідини (1,0 – для рідинного охолодження без циркуляції та 0,7 – для примусового охолодження); k_2 та k_3 - коефіцієнти які враховують конструктивні особливості, приймаємо їх на рівні 1,0.

Головним показником у (5) є щільність теплового потоку на поверхні обмоток - q , яка визначається як:

$$q = \frac{P_k}{\Pi_0}, \quad (6)$$

де Π_0 - площа поверхні солодження обмоток.

Орієнтовне значення щільності теплового потоку на поверхні мідних обмоток трансформатора промислової частоти дорівнює 1400 Вт/м^2 . Тоді при зменшенні втрат в обмотці приблизно у три рази це значення також зменшиться у три рази до значення $\frac{1400}{3} = 467 \text{ Вт/м}^2$. Але це не враховує той факт, що зі збільшенням частоти зменшуються габаритні розміри і обмоток трансформатора, тобто зменшується площа поверхні охолодження обмоток Π_0 . Попередні дослідження автора [11] показали що об'єм трансформатора також зменшується приблизно у три рази. Тоді, виходячи з того, що обмотка має форму циліндру, її поверхня зменшиться орієнтовно в $\sqrt[3]{3^2} = 2,08$ рази, тобто щільність теплового потоку збільшиться до значення $467 \cdot 2,08 = 971 \text{ Вт/м}^2$.

Визначимо співвідношення між перепадами температури на поверхні обмотки трансформатора промислової частоти Θ_{50} , але з примусовим охолодженням та трансформатором підвищеної частоти Θ_f , але без примусової циркуляції масла в системі охолодження:

$$\frac{\Theta_{50}}{\Theta_f} = \frac{0,7 \cdot 1400}{1,0 \cdot 971} \approx 1. \quad (7)$$