

ВТРАТИ У МАГНІТОПРОВІДІ ТРИФАЗНОГО ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПІДВИЩЕНОЇ ЧАСТОТИ

У статті представлені результати визначення рівня втрат потужності у магнітопроводі трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти.

Ключові слова: втрати потужності у магнітопроводі, трифазний тяговий трансформатор підвищеної частоти

В статье представлены результаты определения уровня потерь мощности в магнитопроводе трехфазного тягового трансформатора повышенной частоты.

Ключевые слова: потери мощности в магнитопроводе, трехфазный тяговый трансформатор повышенной частоты

The results of determination of power loss level in magnetic conductor of high frequency three-phase traction transformer are presented in the article.

Keywords: power losses in magnetic circuit, three-phase traction transformer of increased frequency

Вступ

Бурхливий розвиток напівпровідникової перетворювальної техніки дозволив створити високоєфективні перетворювальні пристрої – випрямлячі, інвертори, конвертори. Важливою складовою цих пристроїв є електромагнітні елементи – трансформатори, дроселі й індуктивні елементи. Так, за допомогою трансформаторів здійснюється узгодження вхідної й вихідної напруг перетворювачів, реактори й дроселі служать для фільтрації вищих гармонік, обмеження напруг на елементах перетворювачів і формування струму комутації.

Попередні дослідження автора по використанню перетворювальних структур з підвищеною робочою частотою в тяговому приводі багатосистемних електровозів [1, 2, 3] показали доцільність використання потужних трифазних тягових трансформаторів підвищеної частоти.

Підвищення частоти вимагає використання відповідних магнітних матеріалів для виготовлення магнітопроводу таких трансформаторів, оскільки, як відомо, з підвищенням частоти втрати потужності у магнітопроводі значно збільшуються.

Мета роботи. Провести дослідження по визначенню рівня втрат потужності у магнітопроводі трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти в заданому діапазоні потужностей та надати рекомендації по вибору магнітного матеріалу для виготовлення магнітопроводу цього трансформатора.

Матеріал і результати дослідження

До складу сучасних багатосистемних та електровозів змінного струму входять однофазні тягові трансформатори, які характеризуються деякими особливостями у порівнянні з трансформаторами загальнопромислового виконання [4], 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 %); система охолодження з примусовим масляним охолодженням. 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:

$$\Delta p_{ст} \sim B^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} \quad (1)$$

при базовій індукції 1,0 Тл та базовій частоті 50 Гц [5].

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 збережен-

ні або зменшення 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 та втрат внаслідок магнітної в'язкості (або магнітної післядії).

В праці [6] 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 у сталюму магнітопроводі тягового трансформатора підвищеної частоти використаємо наступне співвідношення [6]:

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

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 прийнято 1000 Гц.

Позначивши

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

отримаємо:

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

де p_0 , α , β – коефіцієнти, отримані після опрацювання експериментальних залежностей $p'(f, B_m)$.

Враховуючи, що втрати у сталюих 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.

В табл. 1 представлено коефіцієнти A , p_0 , α , β для сталей 3422, 3423, 3424, 3425, 3441 [6].

На рис. 1 представлено залежність $p'(f, B_m)$ для різних марок сталей при частоті 1000 Гц.

Таблиця 1

Коефіцієнти A , p_0 , α , β для сталей 3422, 3423, 3424, 3425, 3441

Марка	Товщина стрічки, мм	$p_0 \cdot 10^{-4}$, Вт/см ³	α	β	A , А·см / В·с ^{1/2}
3422	0,08	21,0	1,3	1,6	663
3423	0,08	19,0	1,3	1,8	600
3424	0,08	16,6	1,2	1,6	525
3425	0,08	16,5	1,5	1,8	522
3425	0,05	15,4	1,4	1,6	486
3441	0,03	14,4	1,4	1,6	455
3441	0,01	20,4	1,4	1,6	643

Як відомо, шляхом ефективного зменшення маси та габаритів електромагнітних пристроїв є збільшення робочої частоти. Об'єм (см³) магнітопроводу однофазного трансформатора залежить від частоти у відповідності до виразу [6]:

$$V_M \approx 1,5 \sqrt{\frac{A k_{\text{дод}}}{k_M}} \cdot \frac{P}{f^{1/4} \Delta T}, \quad (5)$$

де P – потужність трансформатора, Вт;

f – робоча частота трансформатора, Гц;

ΔT – температура перегріву магнітопроводу трансформатора, °С;

A – коефіцієнт, який враховує властивості магнітного матеріалу, $\frac{\text{А} \cdot \text{см}}{\text{В} \cdot \text{с}^{1/2}}$ (табл. 1);

$k_{\text{дод}}$ – коефіцієнт, які враховують додаткові втрати у обмотках трансформатора;

$k_{\text{м}}$ – коефіцієнт заповнення вікна трансформатора міддю.

Для потужних трансформаторів з мідними обмотками додаткові втрати не перевищують 10 % [12]. Коефіцієнт заповнення вікна однофазного трансформатора міддю приймаємо рівним 0,3 [7].

Як відомо, температура перегріву магнітопроводу трансформатора визначається системою охолодження трансформатора. У відповідності до ГОСТ 11677-85 в масляних трансформаторах (які звичайно використовуються на електровозах) температура перевищення поверхні магнітопроводу зверх температури охолоджуючого середовища дорівнює 75 °С [7].

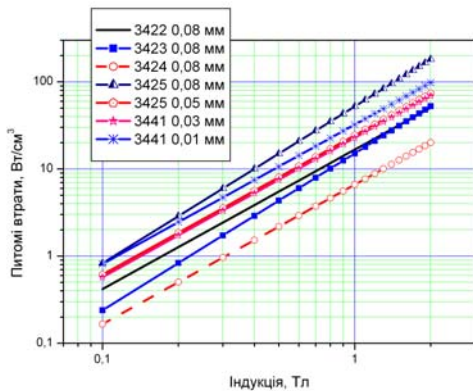


Рис. 1. Залежність $p'(f, B_m)$ для різних марок сталей при частоті 1000 Гц

Використовуючи співвідношення (5), визначимо характер залежності об'єму магнітопроводу від потужності в діапазоні від 500 кВт до 5000 кВт для різних значень частоти. Результати представимо на рис. 2.

Значення індукції B_m , за якої повні втрати є мінімальними, визначається з виразу:

$$\frac{\partial}{\partial B_m} (P_{\text{об}} + P_{\text{м}}) = 0, \quad (6)$$

де $P_{\text{об}}$ – втрати в обмотці трансформатора, Вт;

$P_{\text{м}}$ – втрати у магнітопроводі трансформатора, Вт.

Виходячи з виразу (6), оптимальне (з точки зору мінімуму втрат) значення індукції B_m можна визначати як [6]:

$$B_m = 0,156 \cdot \frac{\sqrt{P}}{\sqrt[4]{A} \cdot f^{7/8} \cdot V_{\text{м}}^{2/3}}. \quad (7)$$

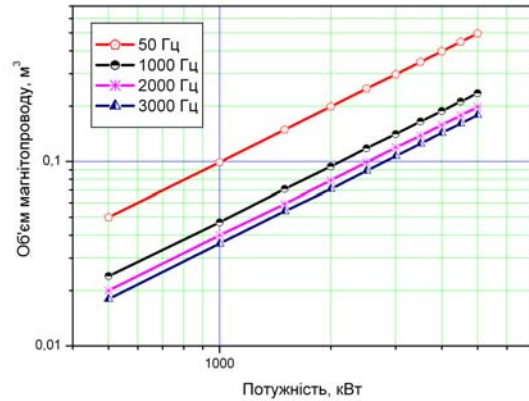


Рис. 2. Залежність об'єму магнітопроводу від потужності для різних значень частоти

Використовуючи співвідношення (7), визначимо залежність оптимального значення магнітної індукції від потужності, в діапазоні від 500 до 5000 кВт для різних значень частоти. Результати представимо на рис. 3.

Як бачимо з рис. 3, реалізувати на частоті 50 Гц трансформатори потужністю від 500 кВт, для визначених вище значень об'єму, при сучасних матеріалах неможливо, оскільки це потребує реалізації індукції рівнем від 11 Тл.

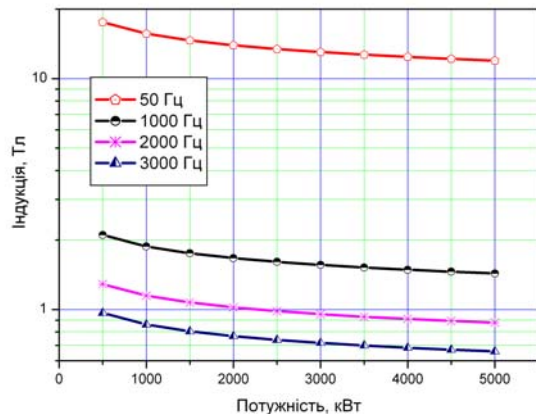


Рис. 3. Залежність оптимального значення магнітної індукції від потужності для різних значень частоти

Більш раціональним є підвищення робочих частот, що підтверджується меншим значенням індукції в магнітопроводі для частоти 3000 Гц, у порівнянні з іншими частотами (рис. 3).

Але збільшення робочої частоти електротехнічних пристроїв обмежується цілим рядом фізичних факторів, а саме:

- зменшенням коефіцієнту перетворення трансформатора за рахунок падіння напруги на індуктивності розсіювання;

- обмеженням можливості по розміщенню обмоток у вікні магнітопроводу, в залежності від способу виконання обмотки.

Враховуючі ці та інші фактори, існує раціональна межа збільшення частоти, яка забезпечує мінімальні габаритні показники та максимальний ККД пристрою. Максимальна частота, яка відповідає верхній межі збільшення частоти, має назву «критична» [6].

Для визначення критичної частоти скористуємося виразом:

$$f_{кр} = \frac{3,98 \cdot 10^6}{A} \sqrt{\frac{\Delta T}{P}}, \text{ Гц.} \quad (8)$$

Використовуючи вираз (8), визначимо залежність критичної частоти для сталей різних марок від потужності в діапазоні від 500 до 5000 кВт для перегріву магнітопроводу 75 °С.

Результати представлено на рис. 4.

Як бачимо з рис. 4, трансформатор виготовлений зі сталей різних марок із товщиною стрічки від 0,01 до 0,08 мм, дозволяє реалізовувати відносно високі робочі частоти перетворювача при забезпеченні мінімальних габаритних показників та максимального ККД.

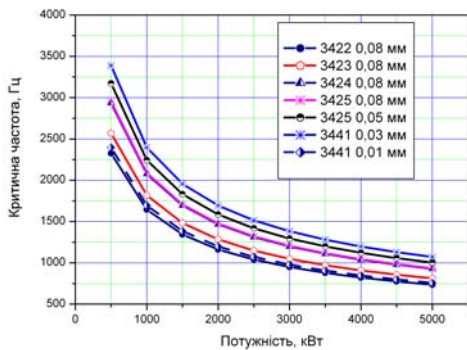


Рис. 4. Залежність критичної частоти для сталей різних марок від потужності

Представлені вище співвідношення та залежності дозволяють визначитися з одним із головних питань, пов'язаних з використанням трансформаторів, а саме – яке значення мають втрати в магнітопроводі, в залежності від частоти та потужності трансформатора, для різних магнітних матеріалів. Втрати у магнітопроводі визначаються як добуток питомих втрат у магнітопроводі та об'єму магнітопроводу.

Поставлену задачу будемо вирішувати за наступною методикою.

По-перше: визначимо залежність об'єму магнітопроводу від потужності для різних магнітних матеріалів за умов роботи трансформатора на критичній частоті.

Таким чином, співвідношення (5), враховуючи (8), приймає вигляд (9).

Результати відповідних розрахунків у графічному вигляді для сталі марки 3422 (товщиною стрічки 0,08 мм) представлено на рис. 5 та деяких інших матеріалів – на рис. 6.

$$V_M \approx 1,5 \sqrt{\frac{Ak_{\text{дод}}}{k_M}} \cdot \frac{P}{(f_{кр})^{1/4} \Delta T} = 1,5 \sqrt{\frac{Ak_{\text{дод}}}{k_M}} \cdot \frac{P}{\left(\frac{3,98 \cdot 10^6}{A} \sqrt{\frac{\Delta T}{P}}\right)^{1/4} \Delta T} \quad (9)$$

По-друге: використовуючи співвідношення (7), (8) та (9), визначимо оптимальні значення магнітної індукції B_m в діапазоні потужностей від 500 до 5000 кВт для значень критичних частот різних марок сталей.

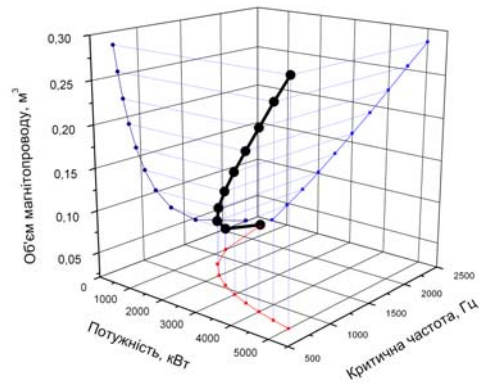


Рис. 5. Залежність об'єму магнітопроводу трансформатора зі сталі марки 3422 (товщиною стрічки 0,08 мм) від потужності та критичної частоти

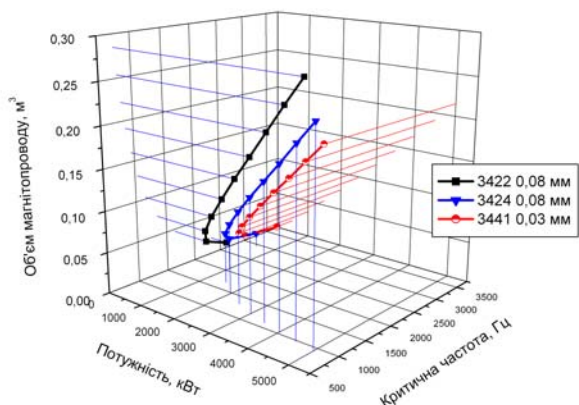


Рис. 6. Залежність об'єму магнітопроводу трансформатора зі сталі різних марок від потужності та критичної частоти

Результати відповідних розрахунків за виразом (7) з урахуванням (5) та (8) у графічному

вигляді для сталі марки 3422 (товщиною стрічки 0,08 мм) представлено на рис. 7 та деяких інших матеріалів – на рис. 8.

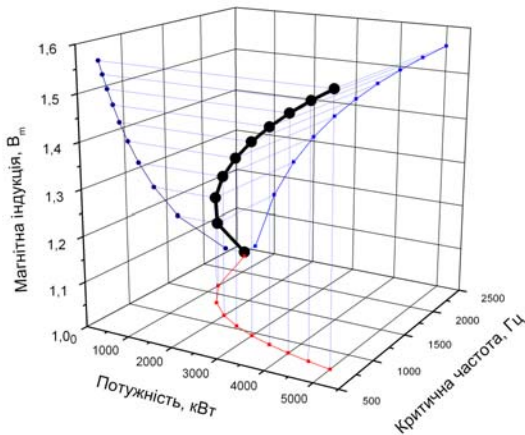


Рис. 7. Залежність значення магнітної індукції B_m в магнітопроводі зі сталі марки 3422 (товщиною стрічки 0,08 мм) від потужності та критичної частоти

На третьому етапі визначимо потужність втрат у магнітопроводі трансформатора для різних марок сталей в діапазоні потужностей від 500 до 50000 кВт та відповідних значень критичної частоти.

Спочатку до виразу (4) підставимо значення $f_{кр}(P)$ та $B_m(P)$, які визначені на другому етапі, – це дозволить визначити питомі втрати для різних марок сталей в досліджуваному діапазоні потужностей. Потім визначимо відносні, до розрахункової потужності, значення втрат у

$$\Delta p(P) = \frac{\left(p_{01} (f_{кр}(P))^\alpha (B_m(P))^\beta \right) \cdot V_m(P)}{P} \cdot 100\% . \quad (10)$$

$$\Delta p_{зф}(P) = \frac{\left(p_{01} (f_{кр}(P))^\alpha (B_m(P))^\beta \right) \cdot (0,81 \cdot V_m(P))}{P} \cdot 100\% . \quad (11)$$

Слід зазначити, що наведені вище результати досліджень відносяться до однофазних трансформаторів підвищеної частоти. Оскільки результати попередніх досліджень обумовлюють доцільність використання у запропонованих перетворювальних структурах трифазних трансформаторів підвищеної частоти, отримані результати по визначенню втрат потужності у магнітопроводах однофазних трансформаторів можливо повністю перенести на трифазні трансформатори.

Це твердження є справедливим, оскільки, як відомо, трифазні трансформатори можуть бути замінені трьома однофазними трансформаторами з тією самою сумарною потужністю, але

магнітопроводах, об'єм яких $V_m(P)$, визначено за допомогою виразу (9).

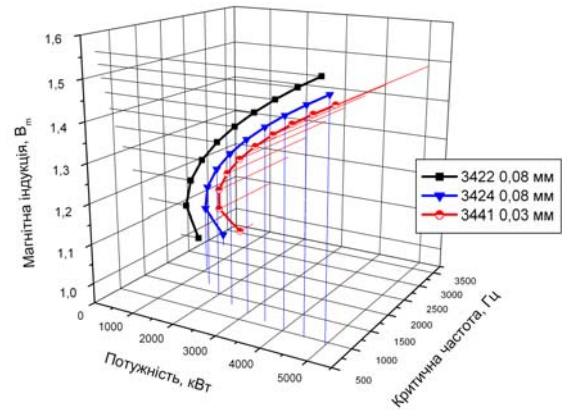


Рис. 8. Залежність значення магнітної індукції B_m в магнітопроводі зі сталей різних марок від потужності та критичної частоти

Результати проведених розрахунків представлено на рис. 9, де втрати у магнітопроводі вказані у відсотках, по відношенню до розрахункового значення потужності відповідно до виразу (10).

Як бачимо з рис. 9, мінімальні втрати потужності мають місце в магнітопроводі, який виготовлено зі сталі марки 3424 (товщина стрічки 0,08 мм). Найбільші втрати потужності зафіксовані у магнітопроводі зі сталі марки 3425 (товщина стрічки 0,08 мм).

при цьому на 19 % збільшиться застосування електротехнічної сталі [7].

Тобто трифазні трансформатори підвищеної частоти будуть мати об'єм магнітопроводу на 19 % менший, що дозволить зменшити втрати потужності на таке ж значення, при цьому до виразу (10) необхідно ввести коефіцієнт 0,81, який враховує зменшення об'єму магнітопроводу, – отримаємо вираз (11).

Діапазон потужностей, який досліджується для трифазних трансформаторів, слід збільшити також у три рази – від 1500 до 150000 кВт.

Результати розрахунків втрат потужності у магнітопроводі трифазних трансформаторів підвищеної частоти для сталей марок 3424

(0,08 мм) та 3425 (0,08 мм) представлено на рис. 11. Інші марки сталі не розглядаються, оскільки їх показники втрат є проміжними (рис. 9).

Для визначення ефективності використання трифазних трансформаторів підвищеної частоти, у порівнянні з трансформаторами промислової частоти, на рис. 10 представлені, відносні до потужності, стандартні значення втрат неробочого ходу трансформаторів, магнітопровід яких зібрано зі 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 [7]. Коефіцієнт потужності приймаємо приблизно $\cos \varphi \approx 1$.

Як бачимо з рис. 10, використання сталі марки 3424 (0,08 мм) для виготовлення магнітопроводу трифазного трансформатора підвищеної частоти дозволяє зменшити втрати у магнітопроводі приблизно у три рази.

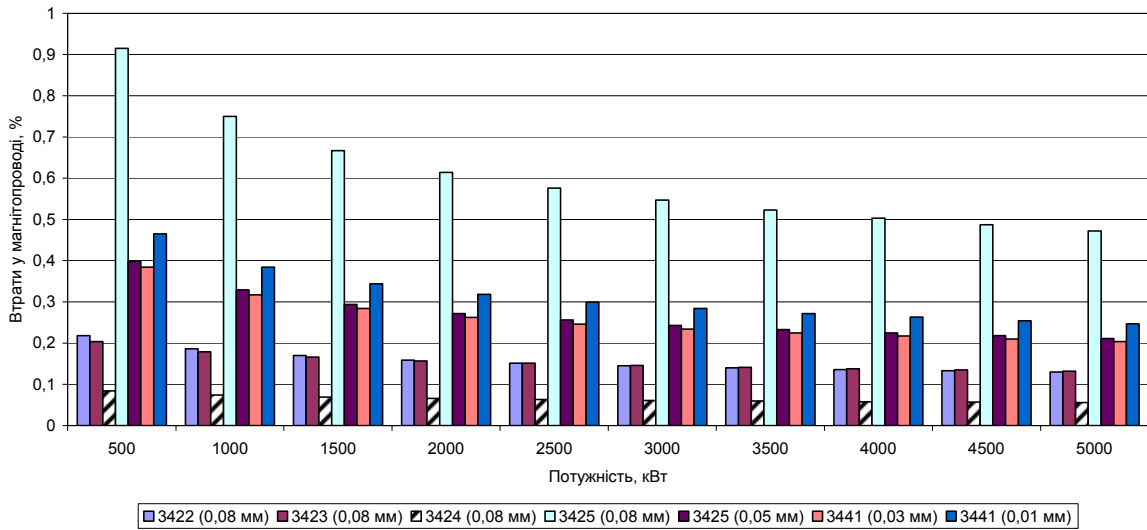


Рис. 9. Відносні втрати у магнітопроводі однофазного трансформатора підвищеної частоти з різних сталей у функції потужності

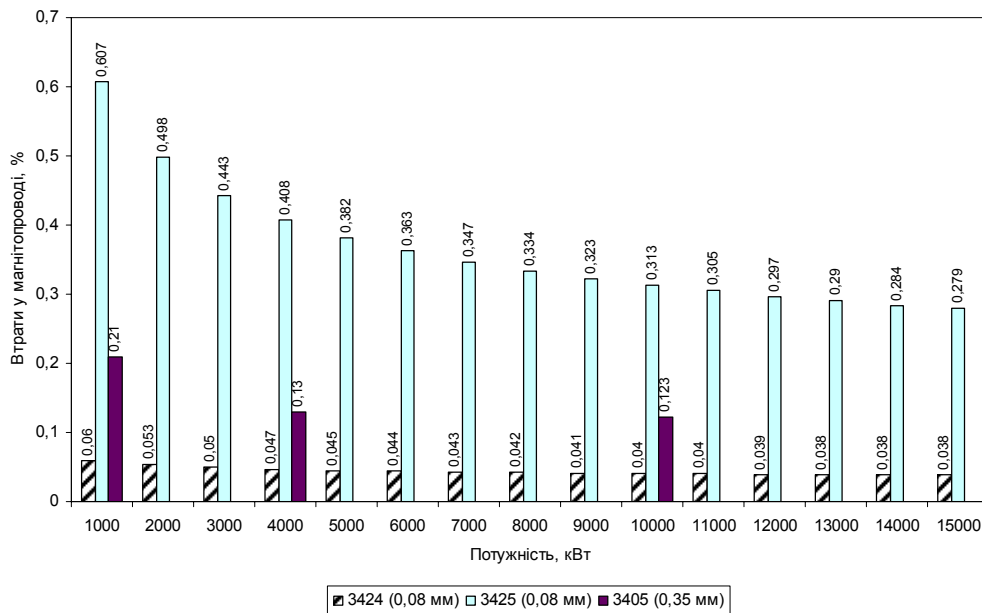


Рис. 10. Відносні втрати у магнітопроводі трифазного трансформатора підвищеної частоти з різних сталей у функції потужності

Використання сталей інших марок призведе до збільшення втрат у магнітопроводі, у порівнянні з трансформаторами промислової частоти,

або ці втрати будуть приблизно однаковими (рис. 9 та 10).

Відносно питання доцільності використання одного трифазного трансформатора підвищеної частоти замість трьох однофазних відмітимо наступне.

При необхідності використання трьох однофазних трансформаторів потужністю 1000 кВт (сталь марки 3424 (0,08 мм)) кожен, доцільним буде використання одного трифазного трансформатора потужністю 3000 кВт (сталь марки 3424 (0,08 мм)), оскільки це дозволить зменшити відносні втрати потужності зі значення $3 \cdot 0,074 = 0,222$ % до значення 0,05 %, тобто вираш складатиме $\frac{0,222}{0,05} = 4,44$ рази, при збільшенні потужності трансформатора в три рази.

Після того як визначилися з матеріалом, з якого доцільно виготовляти магнітопровід трифазного трансформатора підвищеної частоти, повернемося до питання визначення співвідношення між об'ємами магнітопроводів трифазних трансформаторів підвищеної та промисло-

вої частоти.

Перша частина цієї задачі – визначення об'єму трифазного трансформатора підвищеної частоти – вирішена раніш. Об'єм магнітопроводу промислової частоти будемо визначати наступним чином.

Відомо, що втрати неробочого ходу визначаються геометричними розмірами магнітної системи та індукцією в ній. В [7] представлено значення питомих втрат у магнітопроводі трансформатора промислової частоти для сталі 3405 (стрічка 0,30 мм) при 50 Гц. Приймаючи, що магнітопровід є однорідним, визначимо масу магнітопроводу трансформаторів різної потужності (зі стандартного ряду) при індукції в магнітопроводі 1,6 Тл, виходячи зі стандартних значень втрат неробочого ходу, для трансформаторів класу напруг 10 та 35 кВ.

Необхідні для розрахунків числові дані представлено у табл. 2 та 3. Для визначення об'єму приймаємо щільність електротехнічної сталі рівній 7650 кг/м^3 [7].

Таблиця 2

Результати визначення об'єму магнітопроводу трифазного трансформатора промислової частоти

Показник	Потужність, кВА						
	1000	1600	2500	4000	6300	10000	16000
Втрати неробочого ходу p_{050} , Вт	2100	2800	3900	5200	7400	12300	17800
Питомі втрати, Вт/кг	1,15						
Маса магнітопроводу, кг	1826	2435	3391	4522	6435	10696	15478
Об'єм магнітопроводу V_{50} , м ³	0,24	0,32	0,44	0,59	0,84	1,40	2,02

Таблиця 3

Результати визначення об'єму магнітопроводу трифазного трансформатора підвищеної частоти

Показник	Потужність, кВт						
	1000	1600	2500	4000	6300	10000	16000
Критична частота, Гц	2076	1641	1313	1038	827	656	519
Втрати неробочого ходу p_{0f} , Вт	602	887	1283	1890	2750	4026	5933
Об'єм магнітопроводу V_f , м ³	0,039	0,067	0,11	0,186	0,311	0,523	0,887

Аналіз представлених у табл. 2 та 3 даних дозволяє стверджувати, що використання трифазного трансформатора підвищеної частоти

дозволяє зменшити втрати потужності у магнітопроводі приблизно в три рази у всьому роз-

глянутому діапазоні потужностей порівняно з трансформаторами промислової частоти.

Загальні висновки

1. Представлені результати досліджень дозволяють стверджувати, що зі збільшенням потужності трансформатора підвищеної частоти з метою зменшення втрат потужності у магнітопроводі слід зменшувати і робочу частоту. Це декілька зменшить виграш в об'ємі магнітопроводу, але забезпечить збереження значення втрат у магнітопроводі на низькому рівні.

2. Представлені результати досліджень дозволяють рекомендувати для виготовлення магнітопроводів тягових трансформаторів підвищеної частоти сталь марки 3424 товщиною стрічки 0,08 мм, оскільки вона характеризується найменшими питомими втратами.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Дубинець, Л. В. Структурна схема перспективного електровозу подвійного живлення [Текст] / Л. В. Дубинець, Г. М. Чілікін, А. М. Муха // Зб. наук. пр. Дніпродзержинського держ. техн. ун-ту (техн. науки). Тематичний вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. - С. 356-357.

2. Муха, А. М. Порівняльний аналіз перетворювальних структур тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів з тяговими двигунами постійного струму [Текст] / А. М. Муха // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 27. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2009. – С. 93-98.
3. Муха, А. М. Структурна надійність тягового перетворювача для багатосистемного електровоза з асинхронними тяговими двигунами [Текст] / А. М. Муха // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 28 – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2009. – С. 40-47.
4. Подвижной состав электрических железных дорог. Тяговые электрические машины и трансформаторы [Текст] / Н. Н. Захарченко [та ін.]. – М.: Транспорт, 1968. – 296 с.
5. Безрученко, В. Н. Электрические машины [Текст] / В. Н. Безрученко, А. С. Хотян. – К.: Вища шк., 1987. – 215 с.
6. Расчет электромагнитных элементов вторичного электропитания [Текст] / А. Н. Горский [и др.]. – М.: Радио и связь, 1988. – 176 с.
7. Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов [Текст] / П. М. Тихомиров. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

Надійшла до редколегії 31.05.2010.

Прийнята до друку 22.06.2010.