

УДК 629.4.028.1

ДО ПИТАННЯ ВИБОРУ МАТЕРІАЛІВ МАГНІТОПРОВОДУ ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПІДВИЩЕНОЇ ЧАСТОТИ**А. М. Муха, О. О. Карзова, Р. В. Краснов**Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна. E-mail: andremu@i.ua

Підвищення потужності тягового електрообладнання призведе до збільшення його масогабаритних показників, що не завжди є можливим в умовах обмеженого простору кузова електрорухомого складу. Зменшення цих показників може бути досягнуто шляхом підвищення робочих частот, але такий підхід вимагає використання при виробництві відповідних матеріалів. Для виготовлення магнітопроводу потужного тягового трансформатора підвищеної частоти (до 3 кГц) доцільно використовувати електротехнічні сталі марок 3422, 3423, 3424, 3425, які забезпечують реалізацію необхідної потужності, є технологічними та характеризуються відносною стабільністю параметрів під впливом дестабілізуючих факторів. Як критерій оптимального значення магнітної індукції приймаємо мінімум значення втрат у магнітопроводі трансформатора. Розглянуто раціональну межу збільшення частоти, що забезпечує мінімальні габаритні показники та максимальний коефіцієнт корисної дії пристрою. Максимальна частота, яка відповідає верхній межі збільшення частоти, має назву «критична». Досліджено значення магнітної індукції, питомих втрат та критичної частоти для трансформаторів у діапазоні потужностей від 1000 до 16000 кВА. Надані результати досліджень дозволяють стверджувати, що зі збільшенням потужності трансформатора підвищеної частоти з метою зменшення втрат потужності у магнітопроводі слід зменшувати й робочу частоту. Це дещо зменшить вигреш в об'ємі магнітопроводу, але забезпечить збереження значення втрат у магнітопроводі на низькому рівні. Окремим питанням надано дослідження доцільності впровадження трифазних тягових трансформаторів підвищеної частоти та визначено аналітичну залежність для тенденції зміни об'єму магнітопроводу трифазного трансформатора підвищеної частоти порівняно з трансформатором промислової частоти при підвищенні їх потужності. Використання трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти дозволяє зменшити втрати потужності в магнітопроводі приблизно в три рази, порівняно із втратами потужності у магнітопроводі трифазного трансформатора промислової частоти.

Ключові слова: тяговий трансформатор, підвищена частота, магнітопровід, магнітні матеріали, питомі втрати.

К ВОПРОСУ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МАГНИТОПРОВОДА ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ**А. М. Муха, О. О. Карзова, Р. В. Краснов**Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна
ул. Лазаряна, 2, г. Днепропетровск, 49010, Украина. E-mail: andremu@i.ua

Повышение мощности тягового электрооборудования приведет к увеличению его массогабаритных показателей, что не всегда возможно, учитывая ограниченное пространство кузова электроподвижного состава. Уменьшение этих показателей может быть получено путем повышения рабочих частот, но такой подход требует использования при производстве соответствующих материалов. Для изготовления магнітопровода мощного тягового трансформатора повышенной частоты (до 3 кГц) целесообразно использовать электротехнические стали марок 3422, 3423, 3424, 3425, которые обеспечивают реализацию необходимой мощности, характеризуются технологичностью и относительной стабильностью параметров под воздействием дестабилизирующих факторов. В качестве критерия оптимального значения магнитной индукции принимаем минимум значения потерь в магнітопроводе трансформатора. Рассмотрена рациональная граница увеличения частоты, которая обеспечивает минимальные габаритные показатели и максимальный коэффициент полезного действия устройства. Максимальная частота, которая отвечает верхней границе увеличения частоты, имеет название «критическая». Исследованы значения магнитной индукции, удельных потерь и критической частоты для трансформаторов в диапазоне мощностей от 1000 до 16000 кВА. Представленные результаты исследований позволяют утверждать, что с увеличением мощности трансформатора повышенной частоты с целью уменьшения потерь мощности в магнітопроводе следует уменьшать и рабочую частоту. Это незначительно уменьшит выигреш в объеме магнітопровода, но обеспечит сохранение значения потерь в магнітопроводе на низком уровне. Отдельным вопросом представлено исследование целесообразности внедрения трехфазных тяговых трансформаторов повышенной частоты и определена аналитическая зависимость для тенденции изменения объема магнітопровода трехфазного трансформатора повышенной частоты в сравнении с трансформатором промышленной частоты при повышении их мощности. Использование трехфазного тягового трансформатора повышенной частоты позволит уменьшить потери мощности в магнітопроводе приблизительно в три раза по сравнению с потерями мощности в магнітопроводе трехфазного трансформатора промышленной частоты.

Ключевые слова: тяговой трансформатор, повышенная частота, магнітопровід, магнітні матеріали, удельные потери.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. В умовах обмеженого простору кузову тягового електрорухомого складу підвищення робочих частот є перспективним шляхом збільшення питомої потужності тягового електрообладнання, але такий підхід вимагає використання при його виробництві відповідних матеріалів.

Серед проаналізованих літературних джерел є роботи, які присвячені використанню так званих «електронних трансформаторів» та перетворювачів підвищеної частоти в різних системах, у тому числі для тягових перетворювачів та перетворювачів бортового електропостачання електрорухомого складу [1–6]. Але в цих роботах не висвітлені питання особливостей використання потужних тягових трансформаторів підвищеної частоти.

Створення таких трансформаторів вимагає вирішення низки питань, а саме: встановлення співвідношень між масогабаритними показниками, потужністю та робочою частотою трансформатора; визначення рівня втрат у магнітопроводі трансформатора підвищеної частоти, виготовленого з різних матеріалів; надання рекомендацій по конструкції елементів трансформатора при визначенні основних параметрів обмоток трансформаторів.

Метою наданої роботи є аналіз властивостей існуючих магнітних матеріалів та дослідження впливу робочої частоти та індукції на рівень питомих втрат у магнітопроводі тягового трансформатора підвищеної частоти.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. До складу сучасних багатосистемного електрорухомого складу (що експлуатуються у Європі) та електровозів змінного струму входять однофазні тягові трансформатори, які характеризуються деякими особливостями порівняно 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 в 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, яку використовують в існуючих трансформаторах, при підвищеній частоті приблизно визначаються як

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

при базовій індукції 1,0 Тл та базовій частоті 50 Гц [7].

Таким чином, збільшення частоти з 50 до 1000 Гц призведе до приблизного збільшення втрат неробочого 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.

Для виготовлення електромагнітних елементів використовуються магнітом'які магнітні матеріали, які за принципом електропровідності можна розділити на три групи: провідникові – електротехнічні сталі й сплави (пермалої), напівпровідникові – ферити, діелектричні – магнітодіелектрики [8].

Залежно від конкретних умов роботи електромагнітних елементів вимоги до магнітних матеріалів можуть бути різними, але найбільш загальні такі [8]:

- магнітний матеріал повинен легко намагнічуватися та розмагнічуватися, маючи вузьку петлю гістерезису, малу коерцитивну силу та великі значення початкової та максимальної магнітної проникності;

- магнітний матеріал повинен мати велику індукцію насичення, тобто забезпечити максимальний магнітний потік скрізь задану площу перерізу магнітопровода. Слід зазначити, що найбільшу індукцію насичення мають електротехнічні сталі;

- магнітний матеріал повинен мати по можливості мінімальну потужність втрат;

- магнітний матеріал повинен бути пластичним, забезпечувати високу якість штамповок, мати гладку поверхню та незначну залежність магнітних властивостей від механічних напруг;

- бажано мати стабільні магнітні характеристики під впливом дестабілізуючих факторів (температура, вібрація й т.ін.), особливо для пристроїв тягового виконання;

- суттєвим також є вартість та дефіцитність матеріалів.

Залежно від частотного діапазону, на якому працюють перетворювальні установки, для виготовлення магнітопроводів електромагнітних елементів використовуються різні магнітні матеріали: сталі – при частотах від 50 до 10 кГц, сплави – від 5...10 до 20...30 кГц (сплави мікронного прокату – до декількох сотень кілогерців), ферити й магнітодіелектрики – від 10 кГц і вище. Електротехнічні сталі за поширеністю посідають перше місце серед феромагнітних матеріалів і при частотах приблизно до 3000 Гц перебувають поза конкуренцією. Завдяки проведеним дослідженням [9] встановлено, що достатнім значенням робочої частоти ланки підвищеної частоти тягового статичного перетворювача, з точки зору зменшення габаритів обладнання, є частота 500 Гц, а для зменшення маси – 1400 Гц. Ці значення знаходяться в діапазоні частот до 3000 Гц, тобто при створенні тягового трансформатора підвищеної частоти доцільно використовувати саме електротехнічні сталі.

Кращі характеристики мають електротехнічні сталі 3422, 3423, 3424, 3425 товщиною 0,08 й 0,05 мм [8, 10].

Сталі марок 3422–3425 мають менші втрати, велику індукцію насичення (біля 1,9 Тл), відносно високу магнітну проникність у середніх та сильних

полях ($\mu_{r, \max} \approx 8000$) та знижену, порівняно з пермалоевими сплавами, чутливість до механічних ушкоджень [8].

Сплави з високою проникністю (пермалої) мають постійне значення магнітної проникності в широкому діапазоні зміни магнітних полів. Недоліком пермалоїв є чутливість до термічної та механічної обробки, а крім того, вони характеризуються значним розкидом властивостей. Тому пермалої використовують для малопотужних пристроїв [11].

Ферити – полікристалічні багатокомпонентні сполучення, які мають значення питомого об'ємного електричного опору, що перевищує відповідний опір сталей та сплавів у 50 та більше разів. Ці матеріали в постійних магнітних полях та при низьких частотах не використовуються, оскільки порівняно з металічними матеріалами мають знижену індукцію насичення (0,3...0,45 Тл). Ферити використовують у малопотужних високочастотних (не менше 10 кГц) пристроях [8, 10].

Магнітодіелектричні матеріали – це суміш здрібненого феромагнетиту, частки якого електрично відділені одна від одної діелектричним середовищем, яке виконує функцію електричної ізоляції та механічної зв'язки всієї системи. Поширені три основні групи магнітодіелектриків: альсіфери, карбонільне залізо та прессперми. Параметри магнітодіелектриків мало залежать від впливу постійних та змінних магнітних полів, що дозволяє на їх основі будувати лінійні реактори. Але ці матеріали доцільно використовувати при частотах не менше 10 кГц для відносно малопотужних пристроїв (декілька кВт) [8].

Виходячи з наданого аналізу властивостей та галузей застосування різних магнітних матеріалів, робимо наступні висновки: для створення потужних тягових трансформаторів підвищеної частоти в діапазоні робочих частот до 3000 Гц недоцільно використовувати пермалої, ферити та магнітодіелектричні матеріали, які використовують у малопотужних пристроях високої частоти; для виготовлення магнітопроводу потужного тягового трансформатора підвищеної частоти (до 3 кГц) доцільно використовувати електротехнічні сталі марок 3422–3425, які забезпечують реалізацію необхідної потужності, є технологічними та характеризуються відносною стабільністю параметрів під впливом дестабілізуючих факторів.

Основним показником, який визначає доцільність використання магнітного матеріалу для побудови тягового трансформатора підвищеної частоти, є втрати у магнітопроводі, які складаються із втрат на гістерезис, вихрові струми й втрат унаслідок магнітної в'язкості (або магнітної післядії). Із втратами на гістерезис рахуються в сталях і сплавах на низькій частоті (коли вони порівняні з втратами на вихрові струми), у феритах і магнітодіелектриках втрати на гістерезис істотні на всіх частотах [8, 10].

Втрати на гістерезис є властивістю даного матеріалу, й зменшити їх не можна. Вихрові струми в магнітопроводі виникають відповідно із законом

електромагнітної індукції при змінному магнітному потоці, що пронизує магнітопровід. Втрати на вихрові струми залежать від електричної провідності матеріалу. Знизити втрати на вихрові струми можна двома шляхами: зменшити товщину листів (або стрічки, або розміру часток у феродіелектриках) і підвищити питомий електроопір.

Магнітною в'язкістю, або магнітною післядією, називають явище, що виникає у феромагнетиту при швидкій зміні магнітного поля та яке проявляється в специфічному запізнюванні намагніченості матеріалу.

У роботі [8] 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 (у разі не синусоїдального сигналу надані нижче співвідношення є дійсними, як досліджувана частота використовується частота першої гармоніки).

Для визначення питомих втрат у сталюму магнітопроводі тягового трансформатора підвищеної частоти використаємо таке співвідношення [8, 10]:

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

де f – частота, Гц; B_m – амплітуда індукції, Тл; $f^* = 1000$ Гц; $B_m^* = 1$ Тл – базові значення частоти та індукції;

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 $p'(f, B_m)$ [8].

Питому потужність втрат також можна визначити за таким виразом [8]:

$$p' = A f^{2/3} B_m^2, \quad (5)$$

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

За виразом (4) визначимо залежність втрати потужності для сталей різних марок та товщини від зміни частоти та магнітної індукції. Це дозволяє, порівнявши отримані результати, визначити марку сталі, яка при заданих умовах характеризується найменшими втратами. Саме з такого матеріалу доцільно виготовляти магнітопроводи потужних тягових трансформаторів з кращими енергетичними показниками (коефіцієнтом корисної дії).

На рис. 1 використано логарифмічний масштаб осей.

Порівнявши поміж собою зображені на рис. 1 залежності $p'(f, B_m)$, стає очевидним, що для потужних тягових трансформаторів підвищеної частоти на даний час серед матеріалів, що розглядаються

у дослідженні, доцільно використовувати сталь марки 3424 товщиною стрічки 0,08 мм, оскільки вона характеризується найменшими питомими втратами при частоті 1000 Гц і вище порівняно з іншими розглянутими електротехнічними сталями.

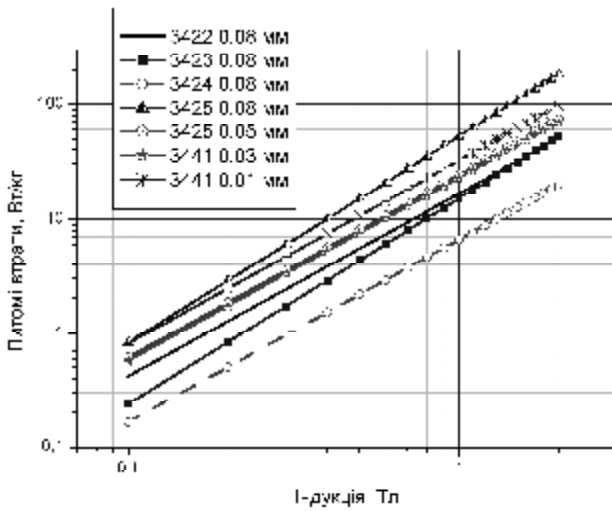


Рисунок 1 – Залежність $p'(f, B_m)$ для різних марок сталей при частоті 1000 Гц

Враховуючи характер залежності $p'(f, B_m)$ при різних частотах, можна стверджувати, що й на інших частотах сталь марки 3424 товщиною стрічки 0,08 мм буде мати найменші питомі втрати порівняно з іншими матеріалами при різних частотах, що підтверджує аналогічна залежність при частоті 2000 Гц (рис. 2).

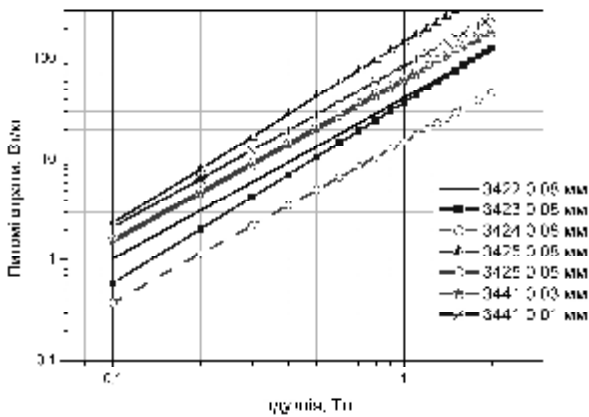


Рисунок 2 – Залежність $p'(f, B_m)$ для різних марок сталей при частоті 2000 Гц

Шляхом ефективного зменшення маси та габаритів електромагнітних пристроїв є збільшення робочої частоти. У роботі [8] доказано, що об'єм магнітопроводу V_m (см³) однофазного трансформатора залежить від частоти відповідно до виразу

$$V_m \approx 1,5 \sqrt{\frac{Ak_{dod}}{k_m}} \frac{P}{f^{1/4} \Delta T}, \quad (6)$$

де P – потужність трансформатора, Вт; f – робоча частота трансформатора, Гц; ΔT – температура перегріву магнітопроводу, °С; A – коефіцієнт, який враховує властивості магнітного матеріалу, $\frac{A \cdot \text{см}}{B \cdot \text{с}^{1/2}}$;

k_{dod} – коефіцієнт, який враховує додаткові втрати в обмотках трансформатора; k_m – 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 [8].

Як відомо, температура перегріву магнітопроводу трансформатора визначається системою охолодження трансформатора. Відповідно до ГОСТ 11677–85 у масляних трансформаторах (які звичайно використовуються на електровозах) температура перевищення поверхні магнітопроводу зверх температури охолоджуючого середовища дорівнює 75 °С [12].

Попередні дослідження [13] дозволили встановити залежність об'єму магнітопроводу від потужності в діапазоні від 500 до 5000 кВт для різних значень частоти. Значення індукції B_m , при якій повні втрати є мінімальними, визначалося з виразу [8]

$$\frac{\partial}{\partial B_m} (P_{ob} + P_m) = 0, \quad (7)$$

де P_{ob} – втрати в обмотці трансформатора, Вт; P_m – втрати у магнітопроводі трансформатора, Вт.

Виходячи з виразу (7), оптимальне (з точки зору мінімуму втрат) значення індукції B_m можна визначати як [8]

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

За співвідношенням (8) визначимо залежність оптимального значення магнітної індукції від потужності трансформатора в діапазоні від 500 до 5000 кВт для різних значень частоти. Результати надамо на рис. 3 та у табл. 1.

Як бачимо з табл. 1, реалізувати на частоті 50 Гц трансформатори потужністю від 500 кВт для визначених вище значень об'єму магнітопроводу трансформаторів цієї потужності при сучасних матеріалах неможливо, оскільки це потребує реалізації індукції рівнем понад 11 Тл (табл. 1, стовпчик 2).

Більш раціональним є підвищення робочих частот, що підтверджується меншим значенням індукції в магнітопроводі для частоти 3000 Гц, порівняно з іншими частотами (рис. 3), при забезпеченні однакових значень потужності трансформатора. Так, оптимальне значення індукції в магнітопроводі трансформатора підвищеної частоти, виготовленого зі сталі марки 3424 товщиною стрічки 0,08 мм потужністю 3000 кВт при робочій частоті 50 Гц складає 13,035 Тл, а при робочій частоті 3000 Гц – тільки 0,717 Тл (табл. 1, рядок 6).

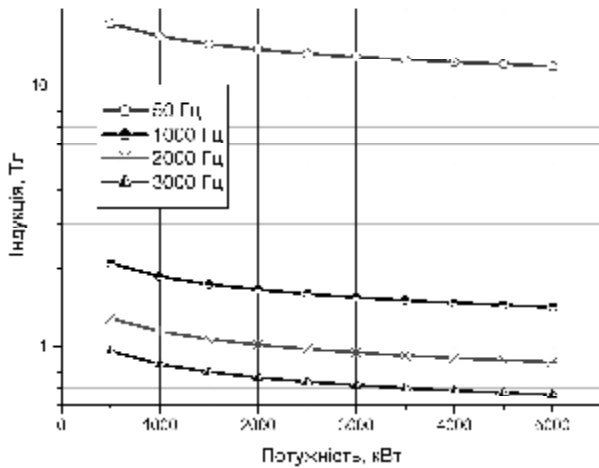


Рисунок 3 – Залежність оптимального значення магнітної індукції від потужності для різних значень частоти

Таблиця 1 – Залежність оптимального значення магнітної індукції від частоти для різних значень потужності

Потужність, кВт		Магнітна індукція (Тл) при частоті (Гц)			
		50	1000	2000	3000
1	2	3	4	5	6
1	500	17,571	2,105	1,288	0,967
2	1000	15,654	1,875	1,148	0,861
3	1500	14,631	1,753	1,073	0,805
4	2000	13,946	1,671	1,022	0,767
5	2500	13,437	1,61	0,985	0,739
6	3000	13,035	1,561	0,956	0,717
7	3500	12,704	1,522	0,931	0,699
8	4000	12,424	1,488	0,911	0,684
9	4500	12,183	1,459	0,893	0,67
10	5000	11,971	1,434	0,878	0,659

Але збільшення робочої частоти електротехнічних пристроїв обмежується цілою низкою фізичних факторів, а саме:

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

- обмеженням можливості по розміщенню обмоток у вікні магнітопроводу залежно від способу виконання обмотки.

З урахуванням цих та інших факторів 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» [8].

Для визначення критичної частоти скористуємося виразом

$$f_{kr} = \frac{3,98 \cdot 10^6}{A} \sqrt{\frac{\Delta T}{P}}, \text{ Гц.} \quad (9)$$

Використовуючи вираз (9), визначимо залежність критичної частоти для сталей різних марок від

потужності в діапазоні 500...5000 кВт для перегріву магнітопроводу 75 °С.

Результати зображено на рис. 4.

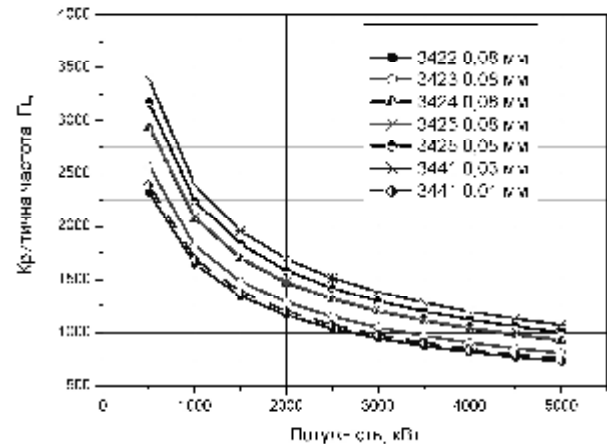


Рисунок 4 – Залежність критичної частоти для сталей різних марок від потужності

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.

Проведені попередні дослідження [13] з визначення рівня втрат у магнітопроводі тягового трансформатора підвищеної частоти дозволяють відмітити наступне. Використання для виготовлення магнітопроводу трифазного трансформатора підвищеної частоти сталі марки 3424 (0,08 мм), порівняно зі сталлю 3404, 3405 або 3406 (товщина стрічки 0,27, 0,3 або 0,35 мм), дозволяє зменшити втрати у магнітопроводі приблизно у три рази (для потужності 1000 кВт це значення $\frac{0,21}{0,06} = 3,5$ рази; 4000 кВт –

$$\frac{0,13}{0,047} = 2,76 \text{ рази; } 10000 \text{ кВт} - \frac{0,123}{0,04} = 3,075 \text{ рази}).$$

Використання сталей інших марок призведе до збільшення втрат у магнітопроводі порівняно з трансформаторами промислової частоти, або ці втрати будуть приблизно однаковими. Так, використання сталі 3425 (0,08 мм) збільшить втрати в магнітопроводі для потужності 1000 кВт у $\frac{0,607}{0,21} = 2,89$ рази;

$$4000 \text{ кВт} - \frac{0,408}{0,13} = 3,13 \text{ рази; } 10000 \text{ кВт} -$$

$$\frac{0,313}{0,123} = 2,5 \text{ рази. Для сталей інших марок, що розг-$$

лядаються, збільшення втрат буде ще значнішим, оскільки вони характеризуються більшими відносними втратами порівняно зі сталлю 3424 (0,08 мм).

Стосовно питання доцільності використання одного трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти замість трьох однофазних зазначимо таке.

За необхідності використання трьох однофазних трансформаторів потужністю 1000 кВт кожен (сталь марки 3424 (0,08 мм)) доцільним буде використання одного трифазного трансформатора потужністю 3000 кВт (сталь марки 3424 (0,08 мм)), оскільки це дозволить зменшити відносні втрати потужності зі значення $3 \cdot 0,074 = 0,222 \%$ (0,074 % – це значення відносних втрат у магнітопроводі однофазного тягового трансформатора підвищеної частоти, відповідно до даних [13], до значення 0,061 %, тобто виграш становитиме $\frac{0,222}{0,061} = 3,63$ рази при збільшенні потужності трансформатора в три рази.

Розглянемо питання визначення співвідношення між об'ємами магнітопроводів трифазних трансформаторів підвищеної та промислової частоти.

Перша частина цієї задачі – визначення об'єму трифазного трансформатора підвищеної частоти заданої потужності – вирішена раніше й включає такі етапи:

– визначення критичної частоти трансформатора за виразом (9);

– визначення об'єму магнітопроводу трифазного трансформатора за виразом (6) та зменшення отриманого результату на 19 % (це значення враховує ефективність використання одного трифазного трансформатора замість трьох однофазних [12]).

Для подальшого порівняння розрахуємо за вищевикладеним порядком, який об'єм буде мати трифазний трансформатор підвищеної частоти, магнітопровід якого виготовлено зі сталі 3424 (0,08 мм). Результати розрахунків зведемо у табл. 2.

Таблиця 2 – Результати визначення об'єму магнітопроводу трифазного трансформатора підвищеної частоти

Показник		Потужність, кВт						
		1000	1600	2500	4000	6300	10000	16000
1		2	3	4	5	6	7	8
1	Критична частота f_{kr} , Гц	2076	1641	1313	1038	827	656	519
2	Втрати неробочого ходу p_{0f} , Вт	602	887	1283	1890	2750	4026	5933
3	Об'єм магнітопроводу V_f , м ³	0,032	0,054	0,089	0,151	0,252	0,423	0,718

Об'єм магнітопроводу трифазного трансформатора промислової частоти будемо визначати, виходячи з наступних міркувань.

Втрати неробочого ходу визначаються геометричними розмірами магнітної системи та індукцією в ній. У [12] надано значення питомих втрат у магнітопроводі трансформатора промислової частоти зі сталі 3405 (стрічка 0,30 мм) при 50 Гц. Приймаючи, що магнітопровід є однорідним, визначимо масу магнітопроводу трансформаторів різної потужності (зі стандартного ряду) при прийнятому значенні індукції в магнітопроводі 1,6 Тл, виходячи зі стандартних значень втрат неробочого ходу для трансформаторів класу напруг 10 та 35 кВ. Необхідні числові дані та результати розрахунків зведено у табл. 3. При визначенні об'єму приймаємо щільність електротехнічної сталі 7650 кг/м³ [12].

Таблиця 3 – Результати визначення об'єму магнітопроводу трифазного трансформатора промислової частоти

Показник		Потужність, кВА						
		1000	1600	2500	4000	6300	10000	16000
1		2	3	4	5	6	7	8
1	Втрати неробочого ходу p_{050} , Вт	2100	2800	3900	5200	7400	12300	17800
2	Питомі втрати, Вт/кг	1,15						
3	Маса магнітопроводу, кг	1826	2435	3391	4522	6435	10696	15478
4	Об'єм магнітопроводу V_{50} , м ³	0,24	0,32	0,44	0,59	0,84	1,40	2,02

Результати порівняння об'ємів магнітопроводів трифазних трансформаторів промислової та підвищеної частоти $\frac{V_{50}}{V_f}$ зобразимо графічно (рис. 5).

Для реалізації можливості орієнтовного визначення виграшу в об'ємі магнітопроводу трифазного трансформатора підвищеної частоти будь-якої потужності, а не тільки значень стандартного ряду, порівняно з трифазними трансформаторами промислової частоти, пропонується графічну залежність, зображену на рис. 5, апроксимувати та отримати аналітичний вираз (у загальному вигляді – експоненціальна другого порядку):

$$y(x) = y_0 + A_1 e^{\left(\frac{-x}{t_1}\right)} + A_2 e^{\left(\frac{-x}{t_2}\right)}. \quad (10)$$

Коефіцієнти апроксимації мають такі значення: $y_0 = -108,52697$; $A_1 = 7,79472$; $t_1 = 1357,46014$; $A_2 = 112,2583$; $t_2 = 2045670$.

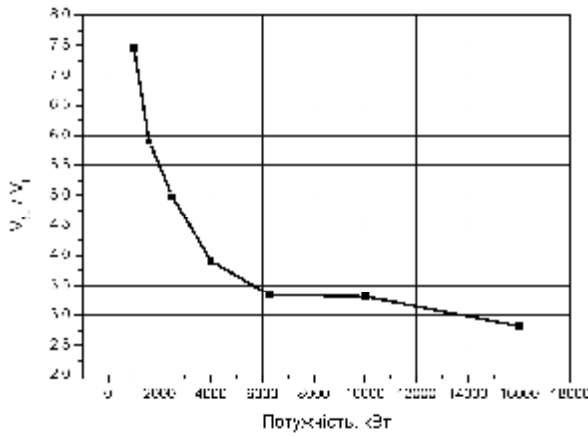


Рисунок 5 – Тенденція зміни об’єму магнітопроводу трифазного трансформатора підвищеної частоти порівняно з трансформатором промислової частоти при підвищенні їх потужності

Результати апроксимації залежності $\frac{V_{50}}{V_f}(P)$ зображено на рис. 6.

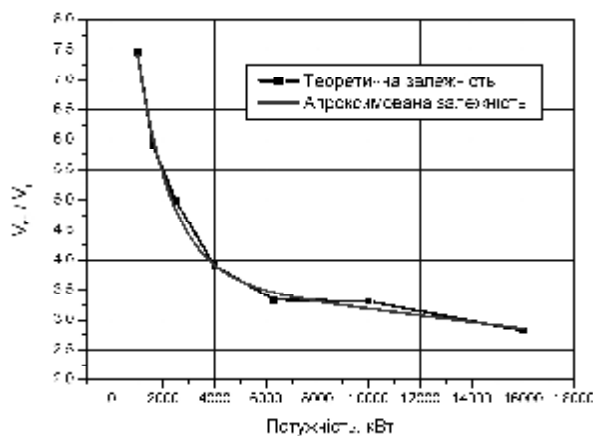


Рисунок 6 – Результати апроксимації залежності $\frac{V_{50}}{V_f}(P)$

Співвідношення (10) дозволяє визначити об’єм сталі магнітопроводу з урахуванням властивостей його матеріалу та конструктивних особливостей трансформатора.

Наприклад, визначимо, який буде мати об’єм магнітопроводу однофазний тяговий трансформатор підвищеної частоти ($f = 1000$ Гц) потужністю 5600 кВт, виготовлений зі сталі марки 3424 товщиною листа 0,08 мм:

$$V_m \approx 1,5 \sqrt{\frac{525 \cdot 0,1}{0,3}} \frac{5600}{1000^{1/4} \cdot 75} 10^{-6} = 0,263 \text{ м}^3. \quad (10)$$

Існуючий тяговий трансформатор типу ОЦР-5600/25 промислової частоти має масу магнітопроводу 2263 кг. При щільності сталі $7650 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

об’єм магнітопроводу трансформатора типу ОЦР-5600/25 буде дорівнювати: $\frac{2263}{7650} = 0,295 \text{ м}^3$.

Тобто об’єми магнітопроводів трансформаторів потужністю 5600 кВт промислової та підвищеної частоти відносяться між собою як $\frac{0,295}{0,263} = 1,12$.

Порівняємо отриманий результат зі значенням орієнтовного зменшення лінійних розмірів трансформатора при підвищенні частоти [9].

Для частоти 1000 Гц [9] зменшення лінійних розмірів трансформатора дорівнює 1,31 рази, розрахунковий вигравш в об’ємі магнітопроводу становитиме 1,12 рази. Між очікуваним та отриманим зменшенням габаритних розмірів трансформатора доволі суттєва різниця $\frac{1,31-1,12}{1,12} 100\% \approx 17\%$. Пояснити

таке розходження можна тим, що дані, приведені у [9], стосуються габаритних розмірів трансформатора з урахуванням розмірів усього трансформатора, вираз (6) стосується тільки магнітопроводу.

Приведені результати досліджень дозволяють стверджувати, що зі збільшенням потужності трансформатора підвищеної частоти, з метою зменшення втрат потужності у магнітопроводі, слід зменшувати й робочу частоту. Це дещо зменшить вигравш в об’ємі магнітопроводу, але забезпечить збереження значення втрат у магнітопроводі на низькому рівні, що ілюструється графічно як залежність відношення втрат неробочого ходу трансформатора промислової частоти до втрат у магнітопроводі трансформатора на підвищену частоту від потужності $\frac{P_{050}}{P_{0f}}$ (рис. 7), визначених за табл. 2, 3.

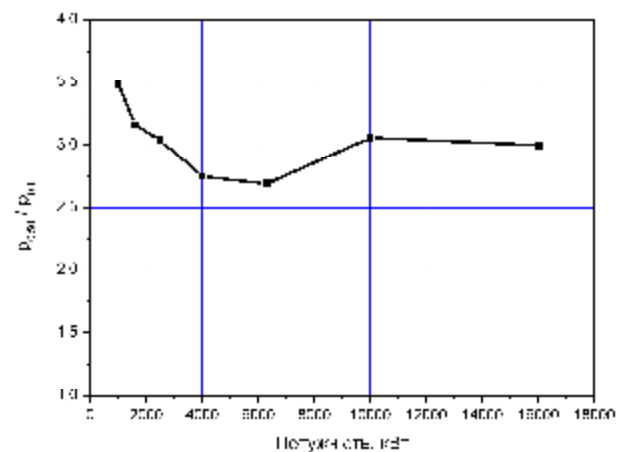


Рисунок 7 – Зменшення втрат у магнітопроводі трифазного трансформатора підвищеної частоти порівняно з трансформатором промислової частоти

Залежність $\frac{P_{050}}{P_{0f}}(P)$, надана на рис. 7, має значення від $\frac{2100 \text{ Вт}}{602 \text{ Вт}} = 3,49$ для потужності трансфор-

матора 1000 кВА (табл. 2, стовпчик 2, рядок 2 та табл. 3, стовпчик 2, рядок 1), до значення $\frac{17800 \text{ Вт}}{5933 \text{ Вт}} = 3,0$ для трансформатора потужністю

16000 кВА. Для інших потужностей трансформаторів співвідношення $\frac{P_{050}}{P_{0f}}(P)$ також є близькими до

наданих значень, тому доцільно визначити середнє значення цієї функції та прийняти його як орієнтовне для подальших досліджень.

Для розглянутих значень потужностей трансформаторів (табл. 2, 3) середнє значення $\frac{P_{050}}{P_{0f}}(P)$ дорівнює:

$$\frac{3,49 + 3,16 + 3,04 + 2,75 + 2,69 + 3,06 + 3,00}{7} = 3,027 .$$

ВИСНОВКИ. 1. Виходячи з вимоги забезпечення мінімального рівня питомих втрат у матеріалі магнітопроводу трансформатора, для магнітопроводу тягового трансформатора підвищеної частоти доцільно використовувати сталь марки 3424 товщиною стрічки 0,08 мм. Сталь цієї марки характеризується мінімальними питомими втратами для заданих частоти f та амплітуди магнітної індукції B_m , порівняно з електротехнічними сталями інших марок, що розглядалися.

2. Отримане середнє значення функції $\frac{P_{050}}{P_{0f}}(P)$ у досліджуваному діапазоні потужностей дозволяє стверджувати, що використання трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти дозволяє зменшити втрати потужності у магнітопроводі приблизно в три рази, порівняно з втратами потужності у магнітопроводі трифазного трансформатора промислової частоти.

Надані результати отримано авторами в рамках досліджень, що проводяться на кафедрі «Електротехніка та електромеханіка» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

ЛІТЕРАТУРА

1. Victor M. Преобразование энергии на электроподвижном составе переменного тока с помощью трансформаторов повышенной частоты // Железные дороги мира. – 2006. – № 6. – С. 49–53.

2. Электронная система Transformator как альтернатива тяговому трансформатору // Железные дороги мира. – 2004. – № 9. – С. 51–53.

3. Steimel A. Power-Electronics Issues of Modern Electric Railway Systems // Advances in Electrical and Computer Engineering. – 2010. – Iss. 10. – № 2. – PP. 3–10.

4. Чумак В.В. Бортовая система электроснабжения электропоездов постоянного тока на основе статических преобразователей: автореф. дис. на соискание степени канд. техн. наук: спец. 05.22.09 «Электротранспорт». – Харьков, 1998. – 20 с.

5. Рутштейн А.М. Система питания вспомогательных цепей магистрального электропоезда постоянного тока от статического преобразователя // Вестник ВЭЛНИИ. – 2004. – № 2. – С. 108–127.

6. Дубинець Л.В., Момот О.І., Маренич О.Л. Електричні машини. Трансформатори. Асинхронні машини: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2004. – 208 с.

7. Захарченко Д.Д., Романов Н.А., Горчаков Е.В., Шляхто П.Н. Подвижной состав электрических железных дорог. Тяговые электрические машины и трансформаторы. – М.: Транспорт, 1968. – 296 с.

8. Горский А.Н., Русин Ю.С., Иванов Н.Р., Сергеева Л.А. Расчет электромагнитных элементов вторичного электропитания. – М.: Радио и связь, 1988. – 176 с.

9. Муха А.М., Дубинець Л.В., Чілікін Г.М. Підвищення робочих частот – перспективний шлях удосконалення тягового обладнання електропоезди подвійного живлення // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: Міжнар. наук.-практ. конф., 24–25 травня 2007 р.: тези доп. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2007. – С. 107–108.

10. Троицкий В.А., Ролик А.И., Яковлев А.И. Магнитодиэлектрики в силовой электротехнике. – Київ: Техніка, 1983. – 207 с.

11. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.

12. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

13. Муха А.М. Втрати у магнітопроводі трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти // Вісник ДНУЗТ. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2010. – № 35. – С. 81–88.

TO THE CHOICE OF THE MATERIALS FOR MAGNETIC CIRCUITS OF THE TRACTION TRANSFORMER OF RAISED FREQUENCY

A. Mukha, O. Karzova, R. Krasnov

Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan vul. Akademika Lazaryana, 2, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine. E-mail: andremu@i.ua

In conditions the limited space of the body of tractive electric rolling stock an increasing the work frequencies is a perspective way to increase the specific power of the traction electric equipment, but such approach requires to use a special materials during its production. For the production of magnetic circuit of powerful traction transformer of the raised frequency (up to 3 kHz) it is reasonable to use the electrotechnical steel such types as 3422, 3423, 3424, 3425, which ensure the implementation of necessary power. They are characterized by processability and the relative stability of its parameters

under influence of destabilizing factors. The best value to magnetic induction is defined from condition of the minimum losses in transformer's magnetic circuit. In work is considered a rational border of the increasing the frequency, which provides the minimum overall dimensions and the maximum of the coefficient of efficiency. The maximum frequency, which corresponding to the upper border of increase the frequency – it's a "critical" frequency. The value of magnetic induction, the specific losses and critical frequency for transformer within the range of powers from 1000 up to 16000 кVA are investigated in the work. Based on the requirement to provision the minimum level of specific losses in material, for magnetic circuit of traction transformer of the raised frequency it is reasonable to use steel of the 3424 type with the thicknesses of the tape 0,08 mm. Presented results of the researches are allow to confirm that with the power increasing of the transformer of the raised frequency it is follows to reduce the work frequency for the reason to reduce the power losses in magnetic circuit. This will reduce the advantage in volume of magnetic circuit, but will provide the conservation of the power losses value in magnetic circuit on low level. The investigation of practicability of the introduction the three-phase traction transformer raised frequency is presented by separate question. Besides it is determined an analytical dependency for the change the volume of magnetic circuit of the three-phase transformer of raised frequency in comparison with a transformer of the industrial frequency under conditions of increasing of their power. Usage the three-phase traction transformer of the raised frequency will allow to reduce the power losses in magnetic circuit approximately in three times, in contrast with the power losses in magnetic circuit of the three-phase transformer of industrial frequency.

Key words: transformer, raised frequency, magnetic circuit, magnetic materials, specific losses.

REFERENCES

- Victor, M. (2006), "The energy conversion at the AC electric rolling stock with the transformer of raised frequency", *Zheleznye dorogi*, no. 6, pp. 49–53. (in Russian)
- "The electronic system "Transformator" as alternative for the traction transformer", *Zhelezniye dorogi mira* (2004), no. 9, pp. 51–53. (in Russian)
- Steimel, A. (2010), "Power-Electronics Issues of Modern Electric Railway Systems", *Advances in Electrical and Computer Engineering*, Vol. 10, no. 2, pp. 3–10.
- Chumak, V.V. (1998), "On-board power supply system of the DC electric locomotives based on the static converters", Abstract of Cand. Sci. (Tech.) dissertation, 05.22.09, Kharkov, Ukraine. (in Russian)
- Rutshtein, A.M. (2004), "The system of electric supply from the static converter for the auxiliary lines of DC main locomotive", *Vestnik VEINII*, no. 2, pp. 108–127. (in Russian)
- Dubinets, L.V., Momot, A.I. and Marenych, O.L. (2004), *Elektrychni mashyny. Transformatory. Asynkhronni mashyny* [Electrical machines. Transformers. Asynchronous machines], Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnepropetrovsk, Ukraine. (in Ukrainian)
- Zakharchenko, D.D., Romanov, N.A., Gorchakov, E.V. and Shlyakhto, P.N. (1968), *Podvizhnoy sostav elektricheskikh zheleznykh dorog. Tyagovye elektricheskije mashiny i transformatory* [Rolling stock of electric railways. Traction electric machines and transformers], Transport, Moscow, Russia. (in Russian)
- Gorskiy, A.N., Rusin, Yu.S., Ivanov, N.R. and Sergeeva, L.A. (1988), *Raschet elektromagnitnykh elementov vtorichnogo elektropitaniya* [Calculation of electromagnetic elements of secondary power], Radio i svyaz, Moscow, Russia. (in Russian)
- Mukha, A.N., Dubinets, L.V. and Chilikin, H.M. (2007), "A raising of the work frequency as a perspective way to improve traction equipment of the electric locomotive of dual power supply", *Problemy ta perspektyvy rozvytku zaliznychnogo transporty. Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia* [The problems and prospects of railway transport development. International scientific & practical conference], Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazarian, May 24–25, 2007, pp. 107–108. (in Ukrainian)
- Troitskii, V.A., Rolik, A.I. and Yakovlev, A.I. (1983), *Magnitodielektriki v silovoy elektrotekhnike* [Magnetodielectrics in power electronic], Tekhnika, Kyiv, Ukraine. (in Russian)
- Tikhmenev, B.N. and Trakhtman, L.M. (1980), *Podvizhnoy sostav elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog. Teoriya raboty elektrooborudovaniya. Elektricheskije skhemy i apparaty* [Rolling stock of electric railways. The theory of electrical equipment operation. Electrical schemes and devices], Transport, Moscow, Russia. (in Russian)
- Tikhomirov, P.M. (1986), *Raschet transformatorov* [Calculation of transformers], Energoatomizdat, Moscow, Russia. (in Russian)
- Mukha, A.N. (2010), "The losses in magnetic circuits of 3-phase transformer with raised frequency", *Visnyk DNUZT*, no. 35, pp. 81–88. (in Ukrainian)

Стаття надійшла 28.02.2013.