

УДК 621.423

А. М. МУХА – д.т.н., доц., Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, andremu@i.ua

О. О. КАРЗОВА – к.т.н., Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Р. В. КРАСНОВ – к.т.н., доцент, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, krasnov_rv@i.ua

УДОСКОНАЛЕННЯ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ТРИФАЗНОГО ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПІДВИЩЕНОЇ ЧАСТОТИ

*Статтю представив д. т. н., проф. Л. В. Дубинець (Україна),
д. т. н., проф. Ф. П. Шкрабець (Україна)*

Визначені попередніми дослідженнями структури перетворювача підвищеної частоти для тягової електропередачі багатосистемного електровоза, мають у своєму складі трансформатор підвищеної частоти. Це є одною з головних особливостей запропонованих систем, оскільки дозволяє зменшити масогабаритні показники перетворювача, з одночасним збільшенням його потужності. Серед проаналізованих літературних джерел [1 – 8] є роботи присвячені використанню так званих «електронних трансформаторів» та перетворювачів підвищеної частоти у різних системах, у тому числі для тягових та перетворювачів бортового електропостачання електрорухомого складу [6, 7]. Але в цих роботах не висвітлені питання особливостей створення потужних трифазних тягових трансформаторів підвищеної частоти.

У сучасних умовах підвищення потужності тягового рухомого складу електротранспорту є обов'язковою умовою при реалізації швидкісного руху. Але збільшення потужності, при збереженні масогабаритних показників тягового електрообладнання, є складною науково-технічною задачею, вирішення якої можливо завдяки використанню систем з напругою підвищеної частоти.

Такий принцип вже застосовується у деяких системах на електротранспорті [1 – 5]. Одним з основних елементів таких систем трансформатор підвищеної частоти, який

може бути виконано як у однофазному так і трифазному виконанні.

Для дослідження режимів роботи будь-якої системи необхідно визначити параметри та режими роботи її основних складових частин. Традиційно для дослідження властивостей та визначення параметрів трансформаторів використовуються схеми заміщення. Найбільш поширеною є Т-подібна схема заміщення трансформатора. Однофазний трансформатор складається з двох обмоток, які розташовані на магнітопроводі. Первинна обмотка підключається до джерела напруги, а вторинна до навантаження (рис. 1) [6 – 8].

На рис. 1 прийняті такі позначення: R_1 , R_2 , L_1 , L_2 - активний опір та індуктивність первинної та вторинної обмоток відповідно; M – коефіцієнт взаємної індукції; Z_n – опір навантаження.

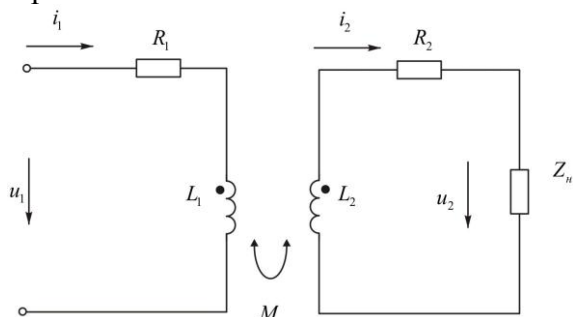


Рис. 1. Схема однофазного двообмоткового трансформатора

За схемою рис. 1 складемо рівняння за другим законом Кірхгофа [7]:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt}, \quad (1)$$

$$0 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} + u_2. \quad (2)$$

Для спрощення виконаємо перехід до приведенного трансформатора та представимо рівняння (1) та (2) у вигляді:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - nM \frac{di_2}{dt} \frac{1}{n}; \quad (3)$$

$$0 = n^2 R_2 \frac{i_2}{n^2} + n^2 L_2 \frac{di_2}{dt} - nM \frac{di_1}{dt} + n u_2, \quad (4)$$

де: $n = \frac{w_1}{w_2}$ – коефіцієнт трансформації;

$\frac{i_2}{n} = i'_2$; $u_2 n = u'_2$; $R_2 n^2 = R'_2$; $L_2 n^2 = L'_2$ – параметри трансформатора, приведені до первинної обмотки.

Тоді отримаємо:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - nM \frac{di'_2}{dt}; \quad (5)$$

$$0 = R'_2 i'_2 + L'_2 \frac{di'_2}{dt} - nM \frac{di_1}{dt} + u'_2, \quad (6)$$

Додамо до рівняння (5) добуток $nM \frac{di_1}{dt} - nM \frac{di_1}{dt}$, а до (6) добуток $nM \frac{di'_2}{dt} - nM \frac{di'_2}{dt}$, отримаємо:

$$u_1 = R_1 i_1 + (L_1 - nM) \frac{di_1}{dt} - nM \frac{d}{dt} (i_1 - i'_2); \quad (7)$$

$$0 = R'_2 i'_2 + (L'_2 - nM) \frac{di'_2}{dt} - nM \frac{d}{dt} (i_1 - i'_2) + u'_2. \quad (8)$$

Величина $L_1 - nM = L_{S1}$ має назву індуктивність розсіювання первинної обмотки;

$L'_2 - nM = L'_{S2}$ – індуктивність розсіювання приведена до первинної обмотки; $nM = L_1 - L_{S1} = L_{1n}$ – індуктивність первинної обмотки, яка обумовлена основним магнітним потоком. Еквівалентна схема трансформатора (Т-подібна схема заміщення), яка відповідає рівнянням (7) та (8) представлена на рис. 2.

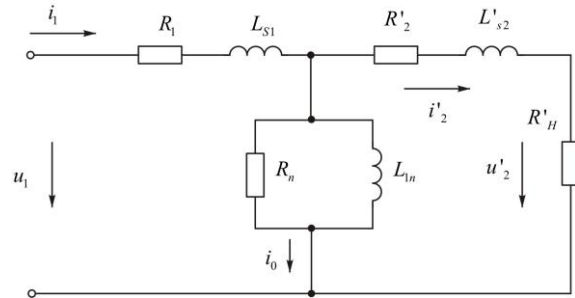


Рис. 2. Т-подібна схема заміщення трансформатора

На рис. 2: коло $L_{1n} R_n$ враховує явища намагнічування магнітопроводу (складова L_{1n}) та втрати у ньому (складова R_n); $i_0 = i_1 - i'_2$ – струм намагнічування магнітопроводу.

При дослідженні роботи трифазних трансформаторів розглядаємо роботу однієї фази, оскільки вважаємо, що всі три фази навантажені симетрично. Для кожної з фаз використовується Т-подібна схема заміщення, представлена на рис. 2.

Для силових трансформаторів у режимі неробочого ходу опір гілки намагнічування не враховує активний та індуктивний опір первинної обмотки [7].

У режимі неробочого ходу (електровоз нерухомий та відсутні будь-які одиниці ЕРС на тяговому плечі) на струмоприймачеві електровоза діє напруга шин тягової підстанції. Відповідно до ГОСТ 6962-75 «Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений» [9] для системи 3 кВ постійного струму напруга на шинах тягової підстанції становить 3300 В.

Струм неробочого ходу трансформатора I_{10} залежить від потужності та робочої на-

пруги трансформатора. Серед стандартного ряду потужностей трансформаторів близькими значеннями до представлених у табл. 1 значень вхідної потужності, є: 1000 кВА; 1600 кВА; 2500 кВА; 4000 кВА; 6300 кВА [10]. Цей ряд потужностей перекриває діапазон потужностей тягових трансформаторів підвищеної частоти від 839,9 кВт до 4098,2 кВт, представлених у табл. 1 (рядок 1), при різних типах силових модулів та видах тягового двигуна.

У першому наближенні приймаємо стандартні значення струмів неробочого ходу, відповідно до потужності трифазного трансформатора.

Так, для трансформатора потужності 1000 кВА струм неробочого ходу дорівнює $I_{10\%1000} = 1,4\%$ від номінального значення I_1 .

Номінальний струм мережевої обмотки однієї фази трансформатора визначаємо для номінального значення потужності зі стандартного ряду та напруги контактної мережі 3000 В ($U_1 = 1350$ В).

При потужності трансформатора 1000 кВА, струм первинної обмотки дорівнює:

$$I_{11000} = \frac{1}{3} \cdot \frac{P}{U_1} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1000 \cdot 10^3}{1350} \approx 246,9 \text{ А}$$

Звідси значення струму неробочого ходу, при потужності трансформатора 1000 кВА:

$$I_{10} = I_{10\%1000} \cdot I_{11000} = 0,014 \cdot 246,9 \approx 3,46 \text{ А}$$

Втрати неробочого ходу P_0 для прийнятого матеріалу магнітопроводу трансформатора підвищеної частоти, для значень потужності 1000 кВт, 1600 кВт, 2500 кВт, 4000 кВт та 6300 кВт відповідно дорівнюють 602 Вт, 887 Вт, 1283 Вт, 1890 Вт та 2750 Вт [10].

Результати розрахунків активного, реактивного та повного опорів гілки намагнічування схеми заміщення трансформатора підвищеної частоти при потужності трансформатора 1000 кВА і вище, які було визначено за формулами (9 – 11), зведені в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри схеми заміщення трансформатора підвищеної частоти для режиму неробочого ходу при різних значеннях потужності

Параметр	Потужність, кВт				
	1000	1600	2500	4000	6300
1 Втрати неробочого ходу P_0 , Вт	602	887	1283	1890	2750
2 Струм неробочого ходу I_{10} , А	3,46	5,14	6,18	8,89	14,01
3 Активний опір гілки намагнічування R_n , Ом	50,3	33,6	33,6	23,9	14,0
4 Повний опір кола намагнічування Z_0 , Ом	429,2	288,9	240,3	167,1	106,0
5 Індуктивний опір кола намагнічування X_n , Ом	426,2	287,0	237,9	165,3	105,1
6 Робоча частота трансформатора f , Гц	2076	1641	1313	1038	827
7 Індуктивність кола намагнічування L_{1n} , Гн	0,033	0,028	0,029	0,025	0,020

Параметри схеми заміщення (див. рис. 2) визначаємо з таких співвідношень

$$Z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}}, \quad (9)$$

$$R_n = \frac{P_0}{I_{10}^2}, \quad (10)$$

$$X_n = \sqrt{Z_0^2 - R_n^2}, \quad (11)$$

де U_{10} – напруга на первинній обмотці трансформатора у режимі неробочого ходу; I_{10} – струм неробочого ходу; R_n – активний опір гілки намагнічування; P_0 – магнітні втрати (втрати неробочого ходу); X_n – індуктивний опір кола намагнічування.

Індуктивність кола намагнічування трансформатора підвищеної частоти (див. рис. 2) потужністю 1000 кВт при робочій частоті $f_{1000} = 2076$ Гц, яка відповідає критичній частоті, дорівнює

$$L_{1n1000} = \frac{X_{n1000}}{2\pi f_{1000}}. \quad (11)$$

За даними табл. 1 побудуємо залежність активного опору та індуктивності кола намагнічування трифазного трансформатора підвищеної частоти в функції потужності (для однієї фази) (рис. 3 та 4).

Для апроксимації отриманих за розрахунками даних використовуємо аналітичну форму, що дає можливість отримати аналітичний вираз у загальному вигляді (експоненціальна функція другого порядку)

$$y(x) = y_0 + A_1 e^{\left(\frac{-x}{t_1}\right)} + A_2 e^{\left(\frac{-x}{t_2}\right)}. \quad (12)$$

Результати апроксимації залежностей та $L_{1n} = f(S)$ представлені на рис. 3 та 4.

Коефіцієнти апроксимації залежності активного опору кола намагнічування трансформатора підвищеної частоти від потужності $R_n = f(S)$ мають такі значення:

$$\begin{aligned} y_0 &= -3,67026, & A_1 &= 54,02712, \\ A_2 &= 13,77407, & t_1 &= 2659,94048, \\ t_2 &= -1.34805 \cdot 10^{92}. \end{aligned}$$

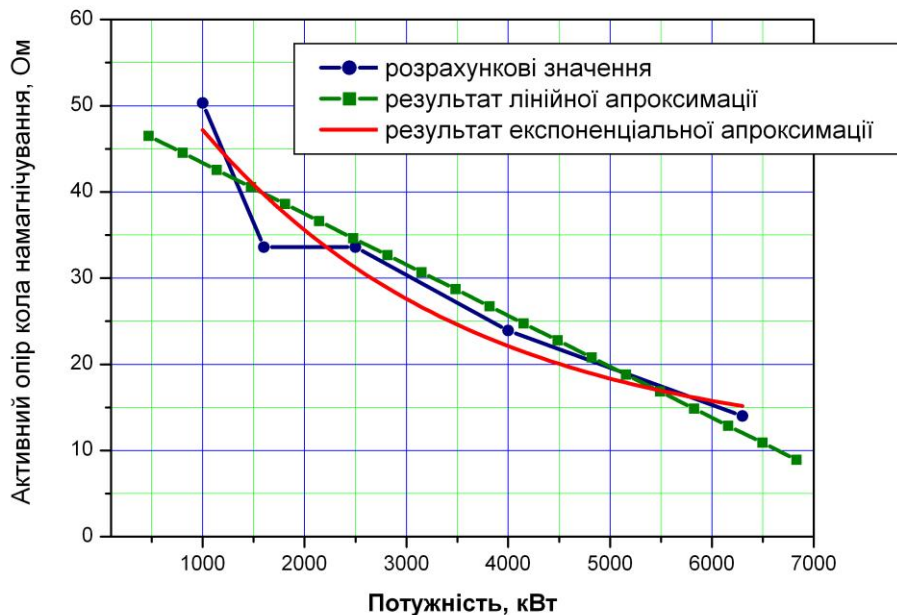


Рис. 3. Залежність активного опору кола намагнічування трансформатора підвищеної частоти від потужності $R_n = f(S)$

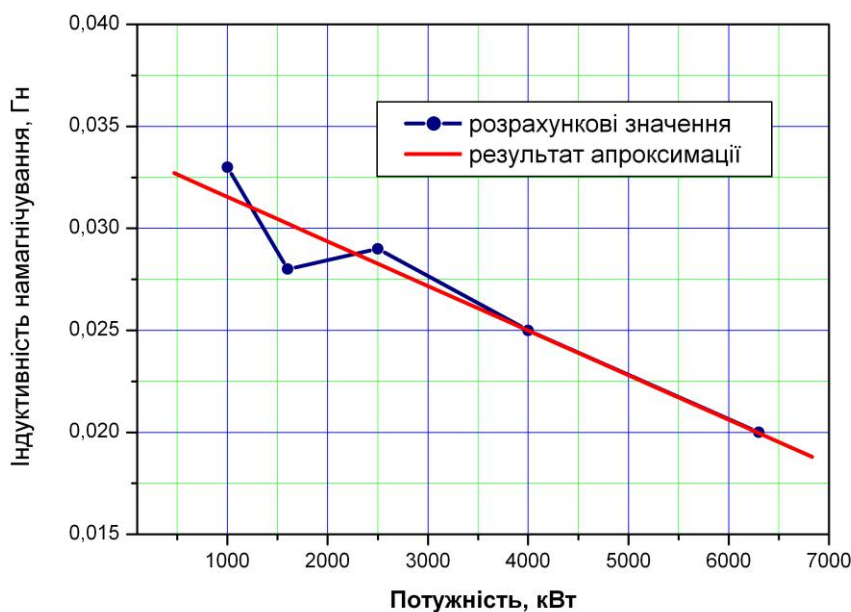


Рис. 4. Залежність індуктивності намагнічування трансформатора підвищеної частоти від потужності $L_{1n} = f(S)$

Для апроксимування залежності індуктивності намагнічування трансформатора підвищеної частоти від потужності $L_{1n} = f(S)$ використана лінійна залежність виду

$$y(x) = A + Bx. \quad (13)$$

Коефіцієнти апроксимації залежності індуктивності намагнічування трансформатора підвищеної частоти від потужності $L_{1n} = f(S)$ (рис. 4) мають наступні значення: $A = 0,03373$, $B = -2,18619 \cdot 10^{-6}$.

У разі використання лінійної апроксимації для розрахункової залежності $R_n = f(S)$ (рис. 3) коефіцієнти апроксимації приймають значення: $A = 49,28112$, $B = -0,00591$.

Використання лінійної апроксимації дозволяє дещо спростити попередні розрахунки параметрів схеми заміщення трансформатора підвищеної частоти.

Визначені в результаті апроксимації розрахункових значень, аналітичні форми залежностей $R_n = f(S)$ і $L_{1n} = f(S)$ дозво-

ляють отримати орієнтовні значення параметрів кола намагнічування трансформатора підвищеної частоти для будь-якого значення потужності в діапазоні $S = [1000; 6300]$ кВА.

Висновок

Таким чином, є необхідність у проведенні досліджень, метою яких є розробка рекомендацій, з урахуванням властивостей сучасної елементної бази щодо її впровадження у складі статичного перетворювача тягової електропередачі багатосистемного електровоза.

Зменшення габаритів трансформаторного обладнання перетворювальної установки визначені, а саме: встановлені частотні діапазони та матеріали для виконання магнітопроводу трансформатора підвищеної частоти у попередніх роботах автора.

З точки зору уніфікації та рівня надійності перетворювача, також рекомендоване використання у складі запропонованих структур трифазних тягових трансформаторів підвищеної частоти. Їх використання

дозволить отримати суттєвий (біля 20%) вигреш у габаритній потужності обладнання.

В роботі запропонована схема заміщення трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти і визначені її параметри для режиму роботи – неробочий хід – для запропонованого діапазону потужностей та відповідних робочих частот, що призначені для проведення комп'ютерного моделювання потрібних режимів роботи статичного перетворювача багатосистемного електровоза при тягових двигунах постійного або змінного струмів.

Бібліографічний список

1. Victor, M. Преобразование энергии на электроподвижном составе переменного тока с помощью трансформаторов повышенной частоты [Текст] / М. Victor // Железные дороги мира. – 2006. – № 6. – С. 49–53.
2. Электронная система eTransformer как альтернатива тяговому трансформатору [Текст] // Железные дороги мира. – 2004. – №9. – С. 51–53.
3. Steimel, A. Power-Electronics Issues of Modern Electric Railway Systems [Text] / A. Steimel // Advances in Electrical and Computer Engineering. vol. 10. – № 2. – 2010. – P. 3–10.
4. Чумак, В. В. Бортовая система электропитания электропоездов постоянного тока на основе статических преобразователей: автореф. дис. на соискание степени канд. техн. наук: спец. 05.22.09 «Электротранспорт» [Текст] / В. В. Чумак. – Харьков, 1998. – 20 с.
5. Рутштейн, А. М. Система питания вспомогательных цепей магистрального электропоезда постоянного тока от статического преобразователя [Текст] / А. М. Рутштейн // Вестник ВЭЛНИИ. – 2004. – №2. – С.108–127.
6. Дубинець, Л. В. Электричні машини. Трансформатори. Асинхронні машини: [Текст] / Л. В. Дубинець, О. І. Момот, О. Л. Маренич – Дніпропетровськ: Видво Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2004. – 208 с.
7. Вдовин, С. С. Проектирование импульсных трансформаторов [Текст] / С. С. Вдовин. – Ленинград: Энергия, 1971. – 148 с.
8. Пиотровский, Л. М. Электрические машины [Текст] / Л. М. Пиотровский – Москва, Ленинград: Госэнергоиздат, 1949. – 528 с.
9. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений: ГОСТ 6962-75. – [действ. от 1977-01-01] [Текст]. – Москва: Издательство стандартов, 1978. – 6 с.
10. Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов [Текст] / П. М. Тихомиров – Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

Ключові слова: тяговий трансформатор підвищеної частоти, параметри, Т-подібна схема заміщення, неробочий хід, потужність, апроксимація.

Ключевые слова: тяговой трансформатор повышенной частоты, параметры, Т-образная схема замещения, холостой ход, мощность, аппроксимация.

Keywords: traction transformer of high frequency, parameters, T-equivalent circuit, idling, power, approximation.

Надійшла до редколегії 25.09.2014

Прийнята до друку 29.11.2014